

Please type a plus sign (+) inside this box -

Approved for use through 09/30/2000 OMB 0951-0032
Patent and Trademark Office U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE
on of information unless it displays a valid OMB control number.

Under the Paperwork Reduction Act of 1995, no persons are required to respond to a collection of information unless it displays a valid OMB control number.

UTILITY PATENT APPLICATION TRANSMITTAL

(Only for new nonprovisional applications under 37 CFR 1.53(b))

Attorney Docket No. 3411-4

First Inventor or Applicant Identifier: Shizuo SUMIDA et al.

Title: NON-LINEAR CHARACTERISTIC REPRODUCING APPARATUS
AND NON-LINEAR CHARACTERISTIC REPRODUCING PROGRAM
STORAGE MEDIUM

Express Mail Label No.

APPLICATION ELEMENTS

See MPEP chapter 600 concerning utility patent application contents.

ADDRESS TO:

Assistant Commissioner for Patents
Box Patent Application
Washington, DC 20231

1. ☐ Fee Transmittal Form (e.g., PTO/SB-17)
(Submit an original, and a duplicate for fee processing)
2. ☒ Japanese Language Specification Total Pages [132]
(preferred arrangement set forth below)
- Descriptive title of the invention
- Cross References to Related Applications
- Statement Regarding Fed sponsored R & D
- Reference to Microfiche Appendix
- Background of the Invention
- Brief Summary of the Invention
- Brief Description of the Drawings (if filed)
- Detailed Description
- Claim(s)
- Abstract of the Disclosure
3. ☒ Drawing(s) (35 USC 113) Total Sheets [80]
4. ☐ Oath or Declaration Total Pages []
a. ☐ Newly executed (original or copy)
b. ☐ Copy from a prior application (37 CFR 1.63(d))
(for continuation/divisional with Box 17 completed)
(Note Box 5 below)
☐ **DELETION OF INVENTOR(S)**
Signed statement attached detailing
inventor(s) named in the prior application,
see 37 CFR 1.63(d)(2) and 1.33(b).
5. ☐ Incorporation By Reference (useable if Box 4b is checked)
The entire disclosure of the prior application, from which a
copy of the oath or declaration is supplied under Box 4,
is considered to be part of the disclosure of the
accompanying application and is hereby incorporated by
reference therein

6. ☐ Microfiche Computer Program (Appendix)
7. Nucleotide and/or Amino Acid Sequence Submission
(if applicable, all necessary)
a. ☐ Computer Readable Copy
b. ☐ Paper Copy (identical to computer copy)
c. ☐ Statement verifying identity of above copies

ACCOMPANYING APPLICATION PARTS

8. ☐ Assignment Papers (cover sheet & document(s))
9. ☐ 37 CFR 3.73(b) Statement [] Power of Attorney
(when there is an assignee)
10. ☐ English Translation Document (if applicable)
11. ☐ Information Disclosure Statement [] Copies of IDS
(IDS)/PTO-1449 Citations
12. ☐ Preliminary Amendment
13. ☒ Return Receipt Postcard (MPEP 503)
(Should be specifically itemized)
14. ☐ Small Entity [] Statement filed in prior application
Statement(s) Status still proper and desired
(PTO/SB/09-12)
15. ☐ Certified Copy of Priority Document
16. ☐ Other

*A new statement is required to be entitled to pay small entity fees,
except where one has been filed in a prior application and is being
relied upon.

17. If a CONTINUING APPLICATION, check appropriate box, and supply the requests information below and in a preliminary amendment
☐ Continuation ☐ Divisional ☐ Continuation-in-part (CIP) of prior application No. _____
Group/Art Unit: _____
Prior application information: Examiner: _____

18. CORRESPONDENCE ADDRESS

☒ Customer Number or Bar Code Label

Customer No. 22204

or ☒ Correspondence address below

(Insert Customer No. or Attach bar code label here)

Name: Jeffrey L. Costella
Firm: NIXON PEABODY LLP.
Address: 8180 Greensboro Drive, Suite 800
City: McLean State: VA
Country: U.S.A. Telephone: (703) 790-9110

Zip Code: 22102
FAX: (703) 883-0370

Name: Jeffrey L. Costella

Registration No. 35,483

Signature

Date: March 18, 2000

Burden Hour Statement: This form is estimated to take 0.2 hours to complete. Time will vary depending upon the needs of the individual case. Any comments on the amount of time you are required to complete this form should be sent to the Chief Information Officer, Patent and Trademark Office, Washington, DC 20231. DO NOT SEND FEES OR COMPLETED FORMS TO THIS ADDRESS. SEND TO: Assistant Commissioner for Patents, Box Patent Application, Washington, DC 20231.

PTO
09/15/1967
04/18/00

04/18/00

34760 U.S. PTO

Title of the Invention

非線形特性再現装置および非線形特性再現プログラム記憶媒体

BACKGROUND OF THE INVENTION

Field of the Invention

本発明は、状態量に非線形変換を施して出力するシミュレーションを行なう非線形特性再現装置、およびコンピュータを非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体に関する。

Description of the Related Art

設計開発の対象であり目的である製品や部品の大半は、その内部に非線形な性質を含み、企画から設計を経て試作試験に至る製品開発の全過程を通して、避けることができない課題である。しかし、この製品開発の全域に影響を及ぼす非線形性には、製品開発にとって障害になる面と有益な2通りの面があり、大変重要な意味を持っている。まず障害となる面には、不確定現象の原因となり、それが製品の機能に影響して性能と信頼性を悪化させることが多く、このような非線形性は極力排除するか製品への影響を回避しなければならない。次に有益な面は、非線形ばね・半導体・リンク機構・クラッチ機構など、線形特性からは得られない機能と特性の創生と実現の手段として積極的に利用されることも多く、このような場合には非線形性の存在が不可欠であり、その活用が機能実現と性能達成の鍵となる。

モデル化に当たっては、この実体が持つ非線形性を忠実に再現する必要がある。しかし、有限要素法を始めとする従来のモデル化手法の大部分は、元来線形な系を対象に発達したので、それによる非線形性の扱いは一般には困難かつ面倒であった。そのために従来の製品モデルにおいては、非線形性を最初から省略するか近似または平均化された等価線形性として扱われるのが普通であった。そして、非線形性が性能に大きく影響する場合や非線形性を利用して必要機能を実現する場合には、複雑で一般性のない数値処理法を用いるか、あるいは熟練技術者の勘と経験に頼り個別に対応せざるを得なかった。このことがモデル化を困難にし、製品開発のコンピュータ援用を阻害する要因の一つにもなっていた。しかし、実際の製品には種々

雑多な非線形性があり、これを全て共通の理論を導いて解くことは困難である。

SUMMARY OF THE INVENTION

本発明は、上記事情に鑑み、製品や部品の非線形な挙動や振る舞いをシミュレーション上で再現する非線形特性再現装置、およびコンピュータをそのような非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体を提供することを目的とする。

上記目的を達成する本発明の非線形特性再現装置のうちの第1の非線形特性再現装置は、所定の第1の状態量を入力し入力された第1の状態量に非線形変換処理を施すことにより第2の状態量を生成して出力する非線形特性再現装置において、

設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に、各標本化時期ごとに線形変換する状態量変換部と、

上記第1の状態量および上記第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における変換のための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを、状態量変換部に設定する非線形特性再生部とを備えたことを特徴とする。

ここで、上記本発明の第1の非線形特性再現装置において、上記非線形特性再生部は、上記推定観測量を入力するとともに1つ以上の変数を入力し、これら入力された推定観測量および1つ以上の変数に基づいて、上記変換パラメータを求めるものであってもよい。

あるいは、1つの変数に基づいて複数の第2の状態量を求めるものであってもよい。

また、上記本発明の第1の非線形特性再現装置において、上記非線形特性再生部は、次期標本化時期における第2の状態量の推定値が上記推定観測量で規格化されてなる規格化推定値を、上記変換パラメータとして求めるものであることが好ましく、この場合、さらに、上記非線形特性再生部は、次期標本化時期における第2の状態量の推定値を上記推定観測量の絶対値で除算又は微分することにより、上記変換パラメータとして上記推定観測量を求めるものであることが好ましい。

また、上記本発明の第1の非線形特性再現装置は、非線形バネの特性を再現する装置であって、

上記状態量変換部は、非線形バネ両端の速度差と、その非線形バネの荷重変化との間の変換を行なうものであり、

上記非線形特性再生部は、非線形バネ両端の速度差の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の非線形バネ両端の速度差とその非線形バネの荷重変化との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを上記状態量変換部に設定するものであることが好ましい形態の1つである。

あるいは、上記本発明の第1の非線形特性再現装置は、空気バネの特性を再現する装置であって、

上記状態量変換部は、空気バネの変形速度と、その空気バネの内部圧力変化との間の変換を行なうものであり、

上記非線形特性再生部は、空気バネの変形速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の空気バネの変形速度とその空気バネの内部圧力変化との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを上記状態量変換部に設定するものであることも好ましい形態である。

さらには、上記本発明の第1の非線形特性再現装置は、リンク機構の特性を再現する装置であって、

上記状態量変換部は、リンク機構の支点部の速度あるいは角速度の値を変換するものであり、

上記非線形特性再生部は、リンク機構の支点部に加わる速度あるいは角速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象のリンク機構の支点部の速度あるいは角速度の値を変換するための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを上記状態量変換部に設定するものであることも好ましい形態である。

この場合に、上記状態量変換部は、上記非線形特性再生部により設定された、リンク機構の支点部の速度あるいは角速度の値の変換に用いる変換パラメータと同一

の変換パラメータを用いて、その支点部の速度あるいは角速度の値を変換するとともに、その支点部に加わる力あるいはトルクの値を変換するものであってもよい。

さらには、上記本発明の第1の非線形特性再現装置は、摩擦を伴って移動する物体の特性を再現する装置であって、

上記状態量変換部は、物体に加わる力とその物体の移動速度との間の変換を行なうものであり、

上記非線形特性再生部は、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、その次期標本化時期における、特性再現対象の物体に加わる力とその物体の移動速度との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを上記状態量変換部に設定するものであることも好ましい形態である。

この場合に、上記非線形特性再生部は、上記物体に加わる摩擦力を変換パラメータとして求めて状態量変換部に設定するものであり、上記状態量変換部は、その物体に加わる力から状態量変換部により設定された摩擦力を減じた力を摩擦力の作用が無視された物体に加えた場合の、その力とその物体の移動速度との間の変換を行なうものであってもよく、

この場合にさらに、上記非線形特性変換部は、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の物体に加わる静摩擦力を求める動摩擦生成部と、物体に加わる力の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の物体に加わる静摩擦力を求める静摩擦生成部と、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、動摩擦生成部で生成された動摩擦力と上記静摩擦生成部で生成された静摩擦力とのうちの一方の摩擦力を選択して、選択した摩擦力を状態量変換部に設定する摩擦力切替部とを有するものであってもよい。

さらにこの場合に、上記動摩擦生成部は、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に応じて値の異なる動摩擦力を求めるものであってもよい。

また、上記本発明の第1の非線形特性再現装置は、角速度に応じて慣性モーメントが変化する可変慣性モーメント機構の特性を再現する装置であって、

上記状態量変換部は、可変慣性モーメント機構に加わるトルクとその可変慣性モーメント機構の角速度との間の変換を行なうものであり、

上記非線形特性再生部は、可変慣性モーメント機構の角速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の可変慣性モーメント機構に加わるトルクとその可変慣性モーメント機構の角加速度との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを上記状態量変換部に設定するものであることも好ましい形態である。

この場合に、特性再現対象の可変慣性モーメント機構が、遠心力に応じて半径方向に並進する並進部材を有するものであって、

上記非線形特性再生部は、その可変慣性モーメント機構の角速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、上記並進部材に加わる遠心力を求める回転並進変換部と、回転並進変換部で求められた遠心力による並進部材の並進運動を再現する並進運動再現部とを備え、並進運動再現部により再現された並進部材の並進運動に応じた変換パラメータを求めて状態量変換部に設定するものであってもよい。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現装置のうちの第2の非線形特性再現装置は、線形系の特性を再現する線形モデル部と、その線形モデル部から、相互に非線形変換の関係にある第1の状態量および第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、上記第1の状態量と上記第2の状態量との間の、次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求める非線形モデル部とを備え、非線形モデル部における次期標本化時期の変換パラメータを求める演算と、線形モデル部における、非線形モデル部で求められた次期標本化時期の変換パラメータを用いた第1の状態量と上記第2の状態量との間の線形変換を含む線形演算とを交互に繰り返すことを特徴とする。

ここで、上記本発明の第2の非線形特性再現装置において、上記非線形モデル部は、相互に非線形変換の関係にあるとともに少なくとも一方の状態量の種類が異なる第1の状態量および第2の状態量に関し、それら第1の状態量および第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、第1の状態量と第2の状態量の間の、次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求める、複数の非線形変換部を有するものであってもよい。

上記本発明の第2の非線形特性再現装置は、ゼネバ機構の特性を再現する装置であって、

上記線形モデル部は、ゼネバ機構の主部と従部との間の角速度どうしの線形変換とそのゼネバ機構の主部と従部との間のトルクどうしの線形変換とを含む線形変換を行なうものであり、

上記非線形モデル部は、ゼネバ機構の主部の角度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、ゼネバ機構の主部と従部との間の角速度どうしの変換とゼネバ機構の主部と従部との間のトルクどうしの変換との双方の線形変換に用いられる、次期標本化時期においてゼネバ機構の主部と従部とが連結されているか否かの情報を含む変換パラメータを求める非線形変換部を有するものであることが好ましい形態の1つである。

また、上記本発明の第2の非線形特性再現装置は、ランプとサーミスタとが直列に接続された液体残量警告灯の特性を再現する装置であって、

上記線形モデル部は、ランプに印加される電圧とそのランプに流れる電流との間の変換と、サーミスタに印加される電圧とサーミスタに流れる電流との間の変換とを含む線形変換を行なうものであり、

上記非線形モデル部は、ランプに印加される電圧の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期におけるランプの抵抗を求める第1の非線形変換部と、サーミスタの消費電力の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期におけるサーミスタの抵抗を求める第2の非線形変換部とを有するものであることも好ましい形態の1つである。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現装置のうちの第3の非線形特性再現装置は、1つ以上の変数を入力し、入力された1つ以上の変数に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される、次期標本化時期における論理値を求める論理判定部と、

所定の入力状態量を入力し、次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との関係が論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じた関係に切り替えられてなる出力状態量を出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする。

ここで、上記の「複数の離散的な値」は、例えば2値（‘0’と‘1’）であってもよく、3値（‘0’と‘1’と‘-1’）であってもよく、このような複数の値をいう。

また、上記の「第1の状態量を切り替えて」とは、論理値が2値で表わされる場合における、例えば、第1の状態量の通過と切断とを切り替えたり、第1の状態量の流れを逆方向に切り替えたりすることや、論理値が3値で表わされる場合における、例えば、第1の状態量の正方向への流れと、逆方向への流れと、流れの停止とを切り替えたりすることなど、第1の状態量を様々な状態に切り替えること等をいう。

上記本発明の第3の非線形特性再現装置において、上記状態量切替部は、次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との接続関係が論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じた接続関係に切り替えられてなる出力状態量を出力するものであってもよく、あるいは、

上記状態量切替部は、入力状態量を積分して出力状態量として出力するものであって、論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値が所定の論理値であった場合に、次期標本化時期において、初期値に切り替えられてなる出力状態量を出力するものであってもよく、さらには、

上記論理判定部は、複数の入力状態量の次期標本化時期における推定観測量に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される次期標本化時期における論理値を求めるものであり、上記状態量切替部は、上記複数の入力状態量を入力して、次期標本化時期において、論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じて選択された入力状態量を出力状態量として出力するものであってもよい。

上記本発明の第3の非線形特性再現装置は、相対移動可能状態と相対移動不能状態とを有する2つの部材を含む機構の特性を再現する装置であって、

上記論理判定部が、それら2つの部材の相対位置もしくはその相対位置から導かれる状態量の、次期標本化時期における推定観測量に基づいて、それら2つの部材が相対移動可能状態にあるか相対移動不能状態にあるかを表わす論理値を求めるものであり、

上記状態量切替部が、それら2つの部材の、相対移動速度と力の配分との関係を

切り替えるものであることが好ましい形態の1つである。

また、上記本発明の第3の非線形特性再現装置は、相対的に滑った滑り状態と相互に接続された接続状態とを有する2つの部材を含むクラッチ機構の特性を再現する装置であって、

上記論理判定部が、それら2つの部材の相対角速度の次期標準化時期における推定観測量に基づいて、それら2つの部材が滑り状態にあるか接続状態にあるかを表わす論理値を求めるものであり、

上記状態量切替部が、それら2つの部材の相対角速度とトルクの配分との関係を切り替えるものであることも好ましい形態の1つである。

さらには、上記本発明の第3の非線形特性再現装置は、駆動軸に制動エネルギーを加えるブレーキ機構の特性を再現する装置であって、

上記論理判定部が、ブレーキが駆動軸から受けているトルクの次期標準化時期の推定観測量に基づいて、駆動軸が回転状態にあるか静止状態にあるかを表わす論理値を求めるものであり、

上記状態量切替部が、駆動軸に与える制動トルクを切り替えるものであることも好ましい形態であり、

上記本発明の第3の非線形特性再現装置は、可動部材にバネを作用させてその可動部材への外力の付加が解除されたときにその可動部材がそのバネの作用により初期状態に自動復帰するとともにその可動部材の可動範囲を制限するストッパが設けられてなる自動復帰機構の特性を再現する装置であって、

上記論理判定部が、上記可動部材の移動位置の次期標準化時期の推定観測量に基づいて、上記可動部材がストッパに干渉したか否かを表わす論理値を求めるものであり、

上記状態量切替部が、上記可動部材の速度もしくは角速度とその可動部材に加わる力もしくはトルクとの関係を切り替えるものであることも好ましい形態である。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現装置のうちの第4の非線形特性再現装置は、所定の第1の状態量を入力し、入力した第1の状態量が所定状態にあるか否かに応じて非線形に切り替えられた第2の状態量を出力する非線形特性再現装置において、

上記第1の状態量の、現在の標準化時期から次期標準化時期に至る間の状態量変動幅を予測する状態変動推定部と、

上記第1の状態量の、現在の標準化時期における値と、その第1の状態量が所定状態にあるか否かを判定するための判定値との偏差を求める状態偏差検出部と、

状態変動推定部で予測された状態量変動幅と状態偏差検出部で求められた偏差との大小に基づいて次期標準化時期における非線形変化を予測した、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める安定状態判定部と、

安定状態判定部で求められた論理値に基づいて切り替えられた第2の状態量を出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする。

ここで、上記第4の非線形特性再現装置において、上記状態偏差検出部は、上記第1の状態量の現在の標準化時期における値と、その第1の状態量が所定の状態にあるか否かを判定するための、上記状態変動推定部で予測された状態量変動幅の正負に応じて異なる判定値との偏差を求めるものであってもよい。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現装置のうちの第5の非線形特性再現装置は、設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に線形変換する状態量変換部を含む、線形系の特性を再現する線形モデル部と、上記線形モデル部から、所定の第1の観測状態量の次期標準化時期の推定観測量を取得しその推定観測量に基づいて変換パラメータを生成して上記状態量変換部に設定する非線形モデル部とを備え、

上記非線形モデル部が、

線形モデル部から上記第1の観測状態量と同一もしくは異なる所定の第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測値を取得し、その第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、相対的に緩慢な挙動変化を示す第1の非線形系の特性が反映された緩慢変化状態量を生成する緩慢変化再生部と、

上記線形モデル部から取得した上記第1の観測状態量の次期標準化時期の推定観測量と、上記緩慢変化再生部で生成された上記緩慢変化状態量とに基づいて、相対的に急激な挙動変化を示す第2の非線形系の特性が反映された変換パラメータを生成して上記状態量変換部に設定する特性生成部とを有するものであることを特徴とする。

この場合において、上記緩慢変化再生部は、

上記第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、上記緩慢変化状態量の、上記線形モデル部の状態が現状のまま継続したとした場合の無限時間経過後の定常値を求める定常値設定部と、

上記定常値設定部で求められた上記緩慢変化状態量の定常値と、既知の、上記第1の非線形系における上記緩慢変化状態量の、正規化された時間変化特性とに基づいて、その第1の非線形系の特性が反映された、上記特性生成部に渡す緩慢変化状態量を生成する正規化応答部とを備えたものであることが好ましい。

この場合に、この第5の非線形特性再現装置が、温度変化に応じて抵抗値が変化する素子を有する系の特性を再現する装置であって、

上記状態量変換部は、抵抗値を表わす変換パラメータが設定されその抵抗値を持つ素子に印加された電圧とその素子に流れる電流との間の変換を行なうものであり

上記定常値設定部は、上記素子で消費されるエネルギーの、次期標準化時期における推定観測量に基づいて、その素子の温度の、その素子で消費されるエネルギーが現状のまま継続したとした場合の無限時間経過後の定常値を求めるものであり、

上記正規化応答部は、上記定常値設定部で求められた、上記素子の温度の定常値と、既知の、上記素子で消費されるエネルギー変化に対するその素子の温度の時間変化を表わす正規化されたステップ応答曲線とに基づいて、上記素子の温度を求めるものであり、

上記特性生成部が、上記正規化応答部で求められた温度に基づいて上記素子の抵抗値を表わす変換パラメータを生成して上記状態量変換部に設定するものであることが好ましい態様の1つである。

この場合に、上記正規化応答部は、さらに周囲温度の観測量にも基づいて、上記素子の温度を求めるものであってもよい。

尚、例えば速度と角速度あるいは力とトルクは、再現対象の機構等が並進系であるか回転系であるかに応じて定まるものであり、したがって上記本発明のいずれにおいても、明示的に表現されていない場合であっても、力はトルクを含む概念であり、トルクは力を含む概念であり、速度は角速度を含む概念であり、角速度は速度

を含む概念であり、位置は回転角度を含む概念であり、他の物理量も同様に解釈される。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体のうちの第1の非線形特性再現プログラム記憶媒体は、コンピュータを、所定の第1の状態量を入力し入力された第1の状態量に非線形変換処理を施すことにより第2の状態量を生成して出力する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に、各標本化時期ごとに線形変換する状態量変換部と、

上記第1の状態量および上記第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における変換のための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを、状態量変換部に設定する非線形特性再生部とを有する非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体のうちの第2の非線形特性再現プログラム記憶媒体は、コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

線形系の特性を再現する線形モデル部と、その線形モデル部から、相互に非線形変換の関係にある第1の状態量および第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、上記第1の状態量と上記第2の状態量との間の、次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求める非線形モデル部とを有し、

非線形モデル部における次期標本化時期の変換パラメータを求める演算と、線形モデル部における、非線形モデル部で求められた次期標本化時期の変換パラメータを用いた上記第1の状態量と上記第2の状態量との間の線形変換を含む線形演算とを交互に繰り返す非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体のうちの第3の非線形特性再現プログラム記憶媒体は、コンピュータを、非線形系を含む系

の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

1つ以上の変数を入力し、入力された1つ以上の変数に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される、次期標本化時期における論理値を求める論理判定部と、

所定の入力状態量を入力し、次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との関係が論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じた関係に切り替えられてなる出力状態量を出力する状態量切替部とを有する非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体のうちの第4の非線形特性再現プログラム記憶媒体は、コンピュータを、所定の第1の状態量を入力し、入力した第1の状態量が所定状態にあるか否かに応じて非線形に切り替えられた第2の状態量を出力する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

上記第1の状態量の、現在の標本化時期から次期標本化時期に至る間の状態量変動幅を予測する状態変動推定部と、

上記第1の状態量の、現在の標本化時期における値と、その第1の状態量が所定状態にあるか否かを判定するための判定値との偏差を求める状態偏差検出部と、

状態変動推定部で予測された状態量変動幅と上記状態偏差検出部で求められた偏差との大小に基づいて次期標本化時期における非線形変化を予測した、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める安定状態判定部と、

安定状態判定部で求められた論理値に基づいて切り替えられた第2の状態量を出力する状態量切替部とを有する非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする。

また、上記目的を達成する本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体のうちの第5の非線形特性再現プログラム記憶媒体は、コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に線形変換する状態量変換部を含む、線形系の特性を再現する線形モデル部と、

上記線形モデル部から、所定の第1の観測状態量の次期標本化時期の推定観測量を取得しその推定観測量に基づいて上記変換パラメータを生成して上記状態量変換部に設定する非線形モデル部とを有し、

非線形モデル部が、

上記線形モデル部から上記第1の観測状態量と同一もしくは異なる所定の第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測値を取得し、その第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、相対的に緩慢な挙動変化を示す第1の非線形系の特性が反映された緩慢変化状態量を生成する緩慢変化再生部と、

上記線形モデル部から取得した上記第1の観測状態量の次期標本化時期の推定観測量と、上記緩慢変化再生部で生成された上記緩慢変化状態量とに基づいて、相対的に急激な挙動変化を示す第2の非線形系の特性が反映された変換パラメータを生成して上記状態量変換部に設定する特性生成部とを有するものである非線形特性再現プログラムを記憶してなることを特徴とする。

尚、ここでは本発明の第1～第5の非線形特性再現プログラム記憶媒体について、それぞれ基本的な形態について述べたが、本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体に記憶された非線形特性再現プログラムには、本発明の第1～第5の非線形特性再現装置の全ての形態を実現する態様が全て含まれる。

以上説明したように、本発明によれば、製品や部品の非線形な挙動や振る舞いをモデル化して再現することができる。

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Fig.1(図1)は、
走行抵抗の機能・機構モデルを示す図である。

Fig.2(図2)は、
動摩擦力和走行抵抗の機能・機構モデルを示す図である。

Fig.3(図3)は、
走行抵抗の機能モデルを示す図である。

Fig.4(図4)は、
機構モデルの階層化（包含関係）を示す図である。

Fig. 5(図 5)は、
本発明の一実施形態としての非線形特性再現装置が実現されたコンピュータの外観斜視図である。

Fig. 6(図 6)は、
図 5 に示すコンピュータのハードウェア構成図である。

Fig. 7(図 7)は、
記憶媒体に記憶された非線形特性再現プログラムの構成を示す模式図である。

Fig. 8(図 8)は、
記憶媒体に記憶された非線形特性再現プログラムの構成を示す模式図である。

Fig. 9(図 9)は、
記憶媒体に記憶された非線形特性再現プログラムの構成を示す模式図である。

Fig. 10(図 10)は、
記憶媒体に記憶された非線形特性再現プログラムの構成を示す模式図である。

Fig. 11(図 11)は、
記憶媒体に記憶された非線形特性再現プログラムの構成を示す模式図である。

Fig. 12(図 12)は、本発明の第 1 の非線形特性再現装置の原理説明的な一実施形態を示す図である。

Fig. 13(図 13)は、
流動蓄積要素の非線形パラメーターを示す図である。

Fig. 14(図 14)は、
円錐バネの構造と荷重特性を示す図である。

Fig. 15(図 15)は、
円錐バネの機能モデルを示す図である。

Fig. 16(図 16)は、
空気圧シリンダーの構造モデルを示す図である。

Fig. 17(図 17)は、
空気圧シリンダーの機能モデルを示す図である。

Fig. 18(図 18)は、
空気圧シリンダーのシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 19(図 19)は、
空気圧シリンダーの $P-V \cdot v-V$ 線図を示す図である。

Fig. 20(図 20)は、
揺動機構の構造モデルを示す図である。

Fig. 21(図 21)は、
揺動機構の機能モデルを示す図である。

Fig. 22(図 22)は、
揺動機構の機能モデルを示す図である。

Fig. 23(図 23)は、
揺動機構のシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 24(図 24)は、
非線形伝達係数 Φ_s の角度特性を示す図である。

Fig. 25(図 25)は、
摩擦の構造モデルを示す図である。

Fig. 26(図 26)は、
摩擦の機能モデルを示す図である。

Fig. 27(図 27)は、
摩擦のシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 28(図 28)は、
可変慣性モーメントの構造モデルを示す図である。

Fig. 29(図 29)は、
可変慣性モーメントの機能・機構モデルを示す図である。

Fig. 30(図 30)は、
可変慣性モーメントのシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 31(図 30)は、
本発明の第 2 の非線形特性再現装置の原理説明的な一実施形態を示す図である。

Fig. 32(図 32)は、
ゼネバ機構の構造モデルを示す図である。

Fig. 33(図 33)は、

ゼネバ機構の機能・機構モデルを示す図である。

Fig. 34(図 3 4)は、
ゼネバ機構のシミュレーション結果（その 1）を示す図である。

Fig. 35(図 3 5)は、
ゼネバ機構のシミュレーション結果（その 2）を示す図である。

Fig. 36(図 3 6)は、
残量警告灯の構成を示す図である。

Fig. 37(図 3 7)は、
残量警告灯の電気回路を示す図である。

Fig. 38(図 3 8)は、
抵抗変化による無接点スイッチの特性を示す図である。

Fig. 39(図 3 9)は、
残量警告灯の機能モデルを示す図である。

Fig. 40(図 4 0)は、
残量警告灯の機能モデルを示す図である。

Fig. 41(図 4 1)は、
警告灯の電圧－電流特性モデルを示す図である。

Fig. 42(図 4 2)は、
サーミスタの外観形状を示す図である。

Fig. 43(図 4 3)は、
サーミスタの機構モデルを示す図である。

Fig. 44(図 4 4)は、
残量警告灯のステップ応答特性を示す図である。

Fig. 45(図 4 5)は、
液面揺動の応答特性を示す図である。

Fig. 46(図 4 6)は、
本発明の第 3 の非線形特性再現装置の原理説明的な一実施形態を示す図である。

Fig. 47(図 4 7)は、
がたの構造モデルを示す図である。

Fig. 48(図 4 8)は、
がたの機能・機構モデルを示す図である。

Fig. 49(図 4 9)は、
衝撃吸収用ダンパーの構造モデルを示す図である。

Fig. 50(図 5 0)は、
衝撃吸収用ダンパーの機能・機構モデルを示す図である。

Fig. 51(図 5 1)は、
衝撃吸収用ダンパーのシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 52(図 5 2)は、
クラッチの構造モデルを示す図である。

Fig. 53(図 5 3)は、
クラッチのトルク伝達特性を示す図である。

Fig. 54(図 5 4)は、
クラッチ機能・機構モデルを示す図である。

Fig. 55(図 5 5)は、
シミュレーション用のクラッチモデルを示す図である。

Fig. 56(図 5 6)は、
クラッチのシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 57(図 5 7)は、
ブレーキの構造モデルを示す図である。

Fig. 58(図 5 8)は、
ブレーキの機能モデルを示す図である。

Fig. 59(図 5 9)は、
ブレーキのシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 60(図 6 0)は、
自動復帰機構の構成を示す図である。

Fig. 61(図 6 1)は、
自動復帰機構の機能モデルを示す図である。

Fig. 62(図 6 2)は、

減衰抵抗係数の非線形特性を示す図である。

Fig. 63(図 6 3)は、
空振り機構の構造を示す図である。

Fig. 64(図 6 4)は、
空振り機構の機能モデルを示す図である。

Fig. 65(図 6 5)は、
本発明の第 4 の非線形特性再現装置の一実施形態のブロック線図である。

Fig. 66(図 6 6)は、
図 6 5 に示す非線形特性再現装置の判定状態を示す図である。

Fig. 67(図 6 7)は、
図 6 5 に示す非線形特性再生装置の、ヒステリシスを持たせたときの判定状態を示す図である。

Fig. 68(図 6 8)は、
本発明の第 5 の非線形特性再現装置の原理説明的な一実施形態を示す図である。

Fig. 69(図 6 9)は、
巻線温度上昇の機能モデルを示す図である。

Fig. 70(図 7 0)は、
巻線温度上昇のシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 71(図 7 1)は、
正特性サーミスタの外観形状を示す図である。

Fig. 72(図 7 2)は、
過負荷保護の機能モデルを示す図である。

Fig. 73(図 7 3)は、
正特性サーミスタの抵抗比特性を示す図である。

Fig. 74(図 7 4)は、
正特性サーミスタの機能モデルを示す図である。

Fig. 75(図 7 5)は、
モータロックの機能モデルを示す図である。

Fig. 76(図 7 6)は、

モータロックのシミュレーション結果を示す図である。

Fig. 77(図 7 7)は、

機能・機構モデルの実行順を示す図である。

Fig. 78(図 7 8)は、

機能モデルの主な記号を示す図である。

Fig. 79(図 7 9)は、

非線形の記号を示す図である。

Fig. 80(図 8 0)は、

積分量(記号)の初期化を示す図である。

Fig. 81(図 8 1)は、

ON-OFFスイッチを示す図である。

Fig. 82(図 8 2)は、

論理積のモデルを示す図である。

Fig. 83(図 8 3)は、

論理和のモデルを示す図である。

DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

以下、非線形性および本発明の基本的な考え方に関する説明と、それに続き本発明の実施形態について説明する。

非線形性は、この世で実用されているシステム・機械・構造物のすべてに含まれると言っても過言ではないほど、一般的な性質である。

例えば、モデルの特性や状態量に関連する非線形には、以下のようなものがあり、その存在場所・発生要因・依存因子・現象や振る舞いは種々雑多であり、全体として捕え所のない扱いにくく厄介な物でもある。

①存在場所については、材料内・部品同士の結合部や接触部・はめあい・軸受け・歯車・電磁石・半導体など、いたる所に存在する。

②発生要因については、物質や媒体と機構や構造に大別され、前者には剛性・減衰・電気抵抗・磁気などの非線形な特性、後者には自在継手・すきま・がた・摩擦などの構造的な非線形が含まれる。

③依存因子については、走行抵抗や空気ばねのように変位・速度・電流・電圧などの状態量に依存するもの、温度や湿度のような環境に依存するもの、揺動機構のように幾何学的構造に依存するもの、がたや開閉器のように構造的な分離・結合に依存するものに分けられる。

これらの多岐に渡る非線形については、これまで過去から先人が努力と研究を重ね、解明されている非線形理論やモデルが数多くある。この発明は、この解明された非線形理論やモデルを製品や部品のモデルに融合させる方法を提示するものである。

非線形系を含む製品や部品のモデルは、当然のこととして線形と非線形のモデルで構成される。このうち、線形のモデル化は線形理論に基づいてモデル化し、線形代数で扱える数学モデルで表すことが条件になる。これに対し非線形な機能は、これらの線形性を考慮した上で、次の2つの面からモデル化して再現する必要がある。

一つは、製品や部品の機構や物理現象などの特徴と細部を機能として明らかにして行く過程で、特性・係数・側負荷（パラメータ）の値が線形な定数から状態量の影響を受けた、非線形な振る舞いのモデル化をすることである。この非線形は、系が受ける気圧や温度などの外部環境の影響も対象となる。ここでは、このような非線形を非線形パラメータと呼ぶ。

今一つは、圧縮ばねが底付きして剛体になる構造上の非線形や、自動車用クラッチの締結時はエンジンと車体が一体となり、開放時は両者が別々に運動する構造上の非線形など、製品や部品の構造や機構に起因する非線形である。この非線形は、モデル内部の状態量を直接接続・開放して、パラメータやモデル自身を切替えるモデル構造の非線形である。ここでは、この非線形を、構造非線形と呼ぶ。

以上から、非線形モデルは、状態量でパラメータ値が変化する非線形パラメータと、状態量を接続・開放してモデル構造を変える構造非線形に集約できる。

（非線形のモデル化手法）

（1）機構モデル

非線形のモデル化には、特性の決定過程を部分的にモデル化する機構モデルを組み込み、結果を線形モデルのパラメータに代入することで、モデルの非線形化が実

現可能である。非線形パラメータ値を変える機構モデルは、線形のモデルから独立した部分モデルとし、その数学モデルも独立させる必要がある。そして、非線形パラメータは、線形モデル上ではあくまでも線形パラメータとして扱い、線形理論の適用を可能にしておく。また、非線形モデルは、使用目的により精度や再現性が異なるので、同じ非線形でも複数のモデルを使い分ける必要がある。従って、機構モデルは入れ子方式による組み替えを可能にして置く必要がある。

(2) スイッチ要素

構造非線形のモデル化については、モデルの中に状態量の接続・開放操作を行うスイッチの働きをする要素を組み込むことで実現できる。このスイッチ要素は、モデルの状態量を直接操作することから、モデルの性質を決めるパラメータの1つと考えることができる。当然、このスイッチ要素は、線形の数学モデルの中に無単位量の0または1の値を持つ係数と同じ変数として扱われ、値が1の時に状態量を接続し、0の時に開放する働きをする。

また、このスイッチ要素は、次の状態量を予測してスイッチを操作する条件判定(式)の機構モデルを必要とする。この判定は、次の標準化時期におけるモデル内部の状態を推定する推定観測量から0又は1の操作量を生成してスイッチ要素を操作(代入)する。この操作によりモデルの実行前に内部接続を組み替えておく。従って、モデルが構造非線形であっても、系全体とその数学モデルは、あくまでも線形として扱える。

(3) 非線形を含むモデル

以上から非線形のモデル化手法は、次のようになる。線形モデルには、包含するパラメータに機構モデルを組み込み、非線形な振る舞いを行うモデルに変える。このモデルの過渡特性は、連続的に変化する非線形パラメータによって、系の固有値は連続性を持ち、応答も連続的に変化することである。また、スイッチ要素を包含する構造非線形のモデルには、次の状態を予測する機構モデルを組み込み、モデルの構造を非線形にする方法である。このモデルの過渡特性は、スイッチ要素によるモデル構造の接続・開放によって、系の固有値が不連続となり、応答に跳躍現象が現れることである。

以上のことから機構モデルは、線形・非線形を問わず全て線形モデルとして、部

品から製品および内部の物理現象までモデル化し、精密で再現性の良いモデル化が可能となる。また、機構モデルは、線形理論を適用するモデルから独立するので、統計モデルや回帰モデル・実験式・ファジーモデル・ニューラルネットワークなど、これまでの製品開発で利用されている多くのモデルが組み込み可能となる。このように非線形のモデル化は、製品・部品に共通する構造・機構や物理現象・支障内容など、過去から解明されて来た非線形理論・工学理論・モデル・蓄積技術などを横断的に適用する汎用性の高いモデル化を可能とする。当然、これらの内容は、全てコンピュータ上で実行して再現することが可能である。

(4) パラメータの非線形化

自動車の走行風による損失特性 C_0 は、速度 v_d の2乗に比例した走行抵抗 f_v を持つことが知られている。これを式で表すと $f_v = C_0 v_d^2$ となる。この式を速度 v_d の積で表すと、 $f_v = C v_d$ の線形式と速度 v_d に比例する非線形な損失特性 $C_v = C_0 v_d$ に分けることができる。この関係は、前者が系全体を線形で表す式、後者が非線形な損失特性を表す式となり、両者は、 v_d を観測した観測量 $v_1 = v_d$ と、 C を C_v に代入する結合条件式 $C = C_v$ で関係付けができる。以上の関係を、機能・機構モデルで表すと図8となる。

図1は、走行速度 v_1 ・ v_2 と駆動抵抗 f_1 ・ f_2 の入出力状態量に走行風の損失特性 C を持つ機能モデルを表し、この四角い枠に観測量 v_1 を入力して非線形損失特性 C_v を生成する機構モデルをグラフとモデルで表現している。同図(a)は、速度の観測量 v_1 の絶対値に比例する非線形損失特性 C_v の関係を、横軸(X軸)を速度 v_1 、縦軸(Y軸)を非線形損失特性 C_v で表したグラフである。また同図(b)は、同じ内容を図78と図79の記号で非線形損失特性 C_v をモデル化して表した例である。この両モデルは、非線形損失特性 C_v の機構モデルを除くと、線形の位差損失特性の基本機能要素そのものである。尚、ここでは、推定観測量については触れない、詳しくは後の事例で述べる。

図1の機能モデルと機構モデルを組み込む結合条件は、次の数学モデルとなる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} f_1 \\ v_2 \\ v_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -C & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\ v_i &= v_d \\ C &= C_v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式（１）は、１行目が機能モデルの支配方程式、２行目が観測量の結合条件式、３行目が損失特性を代入する結合条件式である。

機能モデルに組み込む機構モデルは、次の数学モデルとなる。

$$C_v = C_0 |v_i| \quad (2)$$

式（１）１行目の支配方程式には、２行目と３行目の結合条件式を介して、式（２）の非線形パラメータを決定する機構モデルの数学モデルを組み込むことができる。

（５）非線形理論からのモデル化

これまで述べた非線形パラメータのモデル化について更に考察する。図１の例では、式（１２）の速度 v_i に比例する非線形損失特性 C_v を機構モデルとし、走行風の損失が速度の２乗に比例することを利用して式を分けた。しかし、このような例は、現実の非線形モデルでは少なく、従来から明らかにされている非線形モデルから直接機構モデルに変換する、一般的な方法が望まれる。その考え方としては、計算の実行前に非線形パラメータに加えられる状態量で非線形モデルを除算または微分すれば、機構モデルのモデル化が可能である。例として、図１のモデルをこの方法で表すと、その機構モデルは図２となる。尚、同図下側のタイヤの動摩擦係数 F_f については、後で説明する。

図２の上側に示す枠内の機構モデルは、（ａ）が数式表現、（ｂ）がモデル表現で、両モデルには、速度 v_d の次期標本化時期の推定観測量 v_{i-} 入力されている。図２（ａ）の走行風抵抗の式 $f_v = C_0 V_{i-}^2$ を一般化して関数 $f_v = fnc(V_{i-})$ で表す

と、同図（a）・（b）の走行風抵抗 f_v は、次の数学モデルで表せる。

$$\left. \begin{aligned} f_v &= \left(\text{fnc}(v_{i-}) \frac{1}{|v_{i-}|} \right) v_d \\ v_{i-} &= 2v_{d(k)} - v_{d(k-1)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式（3）は、上側が関数で表した走行風抵抗 f_v でカッコ内の式が機構モデル、下側が速度 v_d の推定観測量 v_{i-} の式である。推定観測量 v_{i-} は、現在の標本化時期の速度を $v_{d(k)}$ と前回の標本化時期の速度 $v_{d(k-1)}$ から求めた速度差を使って、次の標本化時期の速度 $v_{d(k+1)}$ を推定する離散系による近時値である。推定速度 v_{i-} の絶対値は、非線形損失特性 C の入力速度 v_d の推定観測量 v_{i-} である。式（3）の変換が適用できるのは、特性・係数・側負荷に限られる。また、図2の機構モデルに、複数の状態量が入力されても方法は同じである。

図2の機能モデルは、次の数学モデルで表すことが出来る。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} f_1 \\ v_2 \\ v_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -C & 1 & F_{T0}S_{WT} \\ -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ f_2 \\ 1 \end{bmatrix} \\ v_{i-} &= v_d \\ C &= C_v \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式（4）は、上側が支配方程式を示し、下側が機能モデルと機構モデル間の結合条件式である。式（3）の上側で表した関数の機構モデルは、次の数学モデルになる。

$$C_v = C_0 v_i^2 - \frac{1}{|v_{i-}|} \quad (5)$$

（6）構造非線形のモデル化

次に、図2の下側にあるタイヤ動摩擦力 F_T のモデルは、動摩擦力 F_{T0} の側負荷を条件判定 S_{WT} が推定観測量 v_{i-} から車の停止と走行を予測してスイッチ要素 S_{WT} を操作する構造非線形のモデルである。この構造非線形は、速度が $v_{i-} = 0$ のときは条件

判定 $S_{\text{WT}} = 1$ となりスイッチ要素 S_{WT} を On にして側負荷 F_{T0} を開放する、逆に速度が $v_{i-} = 0$ のときは接続する。その結果は、タイヤの動摩擦力 F_T として走行風抵抗 f_v に加算される。

図2の条件判定式とタイヤの動摩擦力は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} & f(v_{i-} = 0) \text{ then } (S_{\text{WT}} = 1) \text{ else } (S_{\text{WT}} = 0) \\ & F_T = S_{\text{WT}} F_{T0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)は、上側が条件判定式、下側がタイヤの動摩擦力で式(4)の上側の式に組み込まれているものと同じである。

ここで、式(13)の零速度の判定を例に条件判定の方法を補足しておく。条件判定には、状態量の零値や指定値を設けて判定することが多くある。計算誤差を含む実際のシミュレーションでは、この判定を数学的に判定することは難しく、判定に失敗すると状態量が標本化周期に同期して振動を起こすことがある。例えば式(6)において、計算誤差を避けるために一定範囲内の速度を零としても、標本化周期の変更や加速度の大小によっては振動現象が発生する。これを避ける方法の一つに、現在(k)の速度 $v_{d(k)}$ 、前回の標本化周期(k-1)との速度差 Δv_d 、次回(標本化時期(K+1))の速度 $v_{d(k+1)}$ から、速度零への安定を予測して判定する方法がある。この条件判定を示すと、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} & \Delta v = v_{d(k)} - v_{d(k-1)} \\ & \text{if } (|v_{d(k)} - V_{\text{TH}}| \leq |\Delta v|) \text{ then } (S_{\text{WT}} = 1) \text{ else } (S_{\text{WT}} = 0) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)は、上側が前回との速度差、下側が条件判定式である。同式の各変数は、 $v_{d(k)}$ が現在の速度、 V_{TH} が判定基準値、 $v_{d(k-1)}$ が前回の標本化時期の速度、 Δv が前回との速度差である。同式の下側の S_{WT} が速度0の判定条件で、条件を満たせば $S_{\text{WT}} = 1$ となり、その他は $S_{\text{WT}} = 0$ となる。尚、零速度の判定基準値を $V_{\text{TH}} = 0$ とすればよい。判定のアルゴリズムは、速度差 Δv が判定基準値 V_{TH} を現在の速度 $v_{d(k)}$ と次の標本化時期の速度 $v_{d(k+1)}$ が跨いだ状態を判定する。すなわち、速度差 Δv を判定基準幅にして、現在の速度 $v_{d(k)}$ がその範囲内にあることを判定する。従って、速度停止

や目標値への収束状態を判定しながらスイッチ要素を操作する条件判定などでは、判定幅を順次減少させながら収束するので、判定基準値と被判定状態量間の残差が少ない収束状態を得ることが可能であり、また、判定値を境に標本化周期に同期して起こる振動を収束させることもできる。

また、条件判定には、判定基準値に幅を持たして判定結果を安定にする方法が良く用いられる。式（７）の下側の条件判定に判定基準幅を持たすと、次の式になる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } (S_{WT} = 0) \text{ I } \left(|v_{d(k)} - V_{SH}| \leq |\Delta v| \right) \text{ then } (S_{WT} = 1) \\ \text{elseif } (S_{WT} = 1) \text{ I } \left(|v_{d(k)} - V_{SL}| \leq |\Delta v| \right) \text{ then } (S_{WT} = 0) \end{array} \right\} \quad (8)$$

式（８）は、 V_{SH} が判定基準の上限、 V_{SL} が判定基準の下限である。その他は式（７）と同じである。同式の判定結果は、速度が判定基準の上限 V_{SH} 以下（速度上昇）の時に上限値 V_{SH} 以上になると判定結果を $S_{WT} = 1$ とし、速度が判定基準の下限 V_{SL} 以上（速度下降）の時に下限値 V_{SL} 以下になると判定結果を $S_{WT} = 0$ とする。

（７）不適切なモデル表現

次に非線形パラメータの好ましくないモデル化例について検討する。

図３は、図１で示す非線形損失特性 C を機能モデルの状態量で直接非線形にするモデル化例である。このモデルの支配方程式は、次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} f_1 = C v_d^2 \left(\frac{v_d}{|v_d|} \right) + f_2 \\ v_2 = -v_1 \end{array} \right\} \quad (9)$$

図３の機能モデルは、状態量を直接操作する式（９）となり一般性のない走行抵抗固有の非線形性を表す数学モデルとなり、線形の支配方程式で表現することは困難である。また、非線形性を固有の機能として数多く持つ製品や部品は、この物理現象の練成を直接数学モデルで解くことは不可能に近く、従来の非線形モデルの限界

とも考えられる。

例えば、式(1)・式(2)と式(9)を比較すると、同一モデルでも式(1)・式(2)は、非線形性の式と線形の式に分かれ、複数の線形式の各状態量を互いに代入して解くことができる。しかし、式(9)の線形式と非線形式が混在した式からは、各非線形式の状態量を互いに代入して解くことは困難である。

このように非線形のモデル化には、同じ機能や挙動でも表現する方法が幾通りもあるが、線形モデルに非線形モデルを融合させるには、モデル化に際して制約を受けることが判る。その制約とは、機能モデルとその支配方程式は線形でモデル化し、これに組み込む非線形性は独立した機構モデルに分けてモデル化することが重要となる。この制約を満たさないモデル化には、以下のような問題が発生する。

①複数の非線形を持つ製品や部品を数学的に解くことが困難。

②支配方程式に線形理論が適用出来ない。

③非線形パラメータのモデルを入れ子方式で組み替られない。

④機能モデルと非線形パラメータのモデルが標準化できない。

以上のことから、図10(a)・(b)は、機能モデルとしては不適切なモデル化の例といえる。

ただし、図3(a)・(b)の表現法は、これを処理するソフトウェア上の配慮があれば、以下のような用法が可能である。

①複雑な系を簡素化し、全体を視覚的に理解する為の系統図や説明図用。

②開発現場で繰り返し使用する機能モデルを簡素化するための表現手段。

③非線形を含む機能モデルやパラメータをシンボル化するための記号。

(8) 車両の走行抵抗モデル

次に図2で示す機能モデルは、図1の非線形損失特性 C_v に動摩擦力 F_T の構造非線形モデルを追加して走行抵抗の精度向上を図った例である。図2の非線形損失特性 C_v とタイヤの動摩擦力 F_T は、車の走行性能や燃費などを決める上で重要な走行負荷である。これを更に詳細にすると次式で表すことができる。

$$f_T = \frac{1}{2} \rho C_d A v_d^2 + \mu_m W_m \cos(\theta) + W_m \sin(\theta)$$

(10)

式(10)は、 ρ が空気密度、 C_d が空気抵抗係数、 A が前面投影面積、 μ_m がタイヤ抵抗係数、 W_m が車両重量、 θ が傾斜角である。同式の前の項は走行風による力 f_v 、中の項がタイヤの動摩擦力 F_T 、後の項が重量による登降坂の力を表している。式(10)の前と中の項を式(3)に倣って速度 v_d の絶対値で整理して、全体を等価非線形損失特性 C_T として一つの機構モデルにまとめ、これに車の質量 W_m/g を付加した機能・機構モデルは、図4となる。尚、同図の、 v_d は車の速度、 f_d は駆動力、 f_T は走行抵抗力、 x_m は内部状態量である。

図4は、下位に展開された階層化構造を包含関係で表した、等価非線形損失特性 C_T の機構モデルである。このモデルには、走行風荷重 f_v とタイヤ動摩擦力 F_T の位置差を再現する機構モデルが下位に組み込まれ、この f_v と F_T を加算して上位に統合し式(10)に倣って変換した等価非線形損失特性 C_T を C に代入する機構モデルとなっている。図4の機構モデルは、上下左右に展開されて体系的にモデル化されていることが判る。

図4の機能モデルの支配方程式と結合条件式は、次式となる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{W_m}{g} & -C & 1 & -W_m \sin(\theta) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_m \\ x_m \\ f_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} v_i = v_d \\ C = C_v \end{array} \right\}$$

図4の機構モデルは、次の数学モデルで表すことができる。

$$\left. \begin{aligned}
 v_{i-} &= x_m + \int_0^{t_{sup}} x'_m dt \\
 v_{i-} &= v_{iv} = v_{iT} \\
 f_v &= \frac{1}{2} \rho C_d A v_{iv}^2 \\
 F_T &= \mu_m W_m \cos(\theta) S_{WT} \\
 C_T &= (f_v + F_T) \frac{1}{|V_{i-}|}
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)は、1行目が次期標本化時期の推定速度 v_i 、2行目が入力された推定速度 v_i を下位機構モデルに分配する結合条件式、3行目が走行風抵抗 f_v を再現する式、4行目がタイヤの動摩擦 F_T を再現する式、5行目が等価非線形損失特性 C_T である。同式の変数は、 v_i が速度 v_i の観測量、 S_{WT} が式(6)の上側の条件判定、 v_{iv} が下位に展開された走行風抵抗の機構モデルに入力される速度、 v_{iT} が下位に展開されたタイヤ摩擦抵抗の機構モデルに入力される速度である。

図4で示すように機構モデルは、スイッチ要素を含む構造非線形も含めて、1個の機構モデルにまとめることができる。これは、同一機能の非線形であれば、これを1つの系と見なして、全体から細部まで垂直展開して体系化できることを示している。

以下、本発明の実施形態について説明する。

以下の実施形態は、コンピュータと、そのコンピュータを本発明の一実施形態としての非線形特性再現装置として動作させるためのプログラムとから構成されており、以下先ずコンピュータ自体について説明し、次いで、そのコンピュータに実現された本発明の実施形態としての非線形特性再現装置の機能について説明する。

図5は、本発明の実施形態としての非線形特性再現装置が実現されたコンピュータの外観斜視図である。

コンピュータ10は、CPU、主記憶装置、ハードディスク、通信用ボード等が

内蔵された本体部 11、本体部 11 からの指示により表示画面 12 a 上に画像や文字列を表示する表示部 12、コンピュータ 10 にユーザの指示を入力するためのキーボード 13、表示画面 12 a 上の任意の位置を指定することにより、その指定時にその位置に表示されていたアイコン等に応じた指示を入力するマウス 14 を備えている。

また、各コンピュータ 10 の本体部 11 には、さらに外観上、フロッピーディスク、CDROM（図 5 には図示せず：図 6 参照）が装填される F D 装填口 11 a；CDROM 装填口 11 b を有しており、それらの内部には、それらの装填口 11 a、11 b から装填されたフロッピーディスクや CDROM をドライブしてアクセスする、フロッピーディスクドライブ、CDROM ドライブも内蔵されている。

ここでは、コンピュータ 10 に装填される CDROM に本発明にいう非線形特性再現プログラムが記憶されており、この CDROM が CDROM 装填口 11 b から本体部 11 内に装填され、CDROM ドライブによりその CDROM に記憶された非線形特性再現プログラムがコンピュータ 10 のハードディスク内にインストールされる。このコンピュータ 10 のハードディスク内にインストールされた非線形特性再現プログラムが起動されると、コンピュータ 10 は、本発明の非線形特性再現装置の一実施形態として動作する。

従って、非線形特性再現プログラムが記憶された CDROM は、本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態に相当する。

また、この CDROM に記憶された非線形特性再現プログラムは、上記のようにしてコンピュータ 10 のハードディスク内にインストールされるが、その非線形特性再現プログラムがインストールされた状態のハードディスクも、本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態に相当する。

さらに、その非線形特性再現プログラムがフロッピーディスク等にダウンロードされるときは、そのダウンロードされた非線形特性再現プログラムを記憶した状態にあるフロッピーディスク等も、本発明の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態に相当する。

図 6 は、図 5 に示すコンピュータのハードウェア構成図である。

ここには、中央演算処理装置（CPU）111、RAM 112、ハードディスク

コントローラ113、フロッピーディスクドライブ114、CDROMドライブ115、マウスコントローラ116、キーボードコントローラ117、およびディスプレイコントローラ118が備えられており、それらはバス110で相互に接続されている。

フロッピーディスクドライブ114、CDROMドライブ115は、図5を参照して説明したように、フロッピーディスク51、CDROM520が装填され、装填されたフロッピーディスク51、CDROM52をアクセスするものである。

また、ここには、ハードディスクコントローラ113によりアクセスされるハードディスク53、マウスコントローラ116により制御されるマウス14、キーボードコントローラ117により制御されるキーボード13、およびディスプレイコントローラ118により制御される表示部12も示されている。

図7～図11は、記憶媒体に記憶された非線形特性再現プログラムの構成を示す概要図である。

これら図7～図11において、各記憶媒体200、300、400、500、600は、いずれも、前述したCDROMやハードディスク、フロッピーディスク等を代表的に示すものである。

図7は、本発明の第1の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態を示すものであり、この記憶媒体200には、状態量変換部220と非線形特性再生部230とを有する非線形特性再現プログラム210が記憶されている。この非線形特性再現プログラム210は、コンピュータを、所定の第1の状態量を入力し入力された第1の状態量に非線形変換処理を施すことにより第2の状態量を生成して出力する非線形特性再現装置として動作させるものである。

ここで、状態量変換部220は、設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に、各標準化時期ごとに線形変換するものであり、また非線形特性再生部230は、上記第1の状態量および上記第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標準化時期の推定観測量に基づいて、次期標準化時期における変換のための変換パラメータを求め、求めた変換パラメータを、状態量変換部220に設定するものである。また、非線形特性再生部230は、上記推定観測量を入力するとともに1つ以上の変数を

入力し、これら入力された推定観測量および1つ以上の変数に基づいて、変換パラメータを求める場合もある。

この非線形特性再生部230では、具体的には、次期標本化時期における第2の状態量の推定値が上記推定観測量で規格化されてなる規格化推定値が、変換パラメータとして求められ、さらに具体的には、この非線形特性再生部230では、次期標本化時期における第2の状態量の推定値が上記推定観測量の絶対値で除算又は微分され、これにより、上記変換パラメータとしての推定観測量が求められる。

この非線形特性再現プログラム200は、後述するように、例えば非線形バネの特性の再現、空気バネの特性の再現、リンク機構の特性の再現、摩擦を伴って移動する物体の特性の再現、および角速度に応じて慣性モーメントが変化する可変換性モーメント機構の特性の再現などに好適に用いられる。

図8は、本発明の第2の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態を示すものであり、この記憶媒体300には、線形モデル部320と非線形モデル部330とを有する非線形特性再現プログラム310が記憶されている。この非線形特性再現プログラム310を構成する非線形モデル部330は、その形態に応じた数の非線形変換部331a, 331b, ..., 331nを有する。この非線形変換部はその態様に応じては1つのみの場合もあるが、図8には一般的に複数の非線形変換部が示されている。

この非線形特性再現プログラム310は、コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させるものであり、線形モデル部320は線形系の特性を再現する部分、非線形モデル部330は、線形モデル部320から、相互に非線形変換の関係にある第1の状態量および第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、上記第1の状態量と上記第2の状態量との間の、次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求めるものである。非線形モデル部330における次期標本化時期の変換パラメータを求める演算と、線形モデル部320における、前記非線形モデル部330で求められた次期標本化時期の変換パラメータを用いた第1の状態量と第2の状態量との間の線形変換を含む線形演算は、交互に繰り返される。

非線形モデル部 330 を構成する非線形変換部 331a, 331b, ..., 331n は相互に非線形変換の関係にあるとともに少なくとも一方の状態量の種類が異なる第 1 の状態量および第 2 の状態量を取り扱う部分であって、非線形変換部 331a, 331b, ..., 331n のそれぞれは、その非線形変換部で取り扱われる第 1 の状態量および第 2 の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいはその状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、それら第 1 の状態量と第 2 の状態量との間の、次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求めるものである。

この非線形特性再現プログラム 310 は、後述するように、例えばゼネバ機構の特性の再現や、ランプとサーミスタとが直列に接続された液体残量警告灯の特性の再現等に好適に用いられる。

図 9 は、本発明の第 3 の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態を示すものであり、この記憶媒体 400 には、論理判定部 420 と状態量切替部 430 とを有する非線形特性再現プログラム 410 が記憶されている。この非線形特性再現プログラムは、コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させるものである。

論理判定部 420 には、1 つ以上の変数が入力され、この論理判定部 420 では、入力された 1 つ以上の変数に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される、次期標本化時期における論理値が求められる。

また、状態量切替部 430 には、所定の入力状態量が入力され、この状態量切替部 430 では、次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との関係が論理判定部 420 で求められた次期標本化時期における論理値に応じた関係に切り替えられてなる出力状態量が出力される。

ここで状態量切替部 430 は、その態様によっては、次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との接続関係が論理判定部 420 で求められた次期標本化時期における論理値に応じた接続関係に切り替えられてなる出力状態量を出力するものであり、あるいは、状態量切替部 430 は、その態様によっては、入力状態量を積分して出力状態量として出力するものであって、論理判定部 420 で求められた次期標本化時期における論理値が所定の論理値であった場合に、その次期標本化

時期において、初期値に切り替えられてなる出力状態量を出力するものである。

また、その態様によっては、前記論理判定部420では、複数の入力状態量の次期標本化時期における推定観測量に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される次期標本化時期における論理値が求められ、状態量切替部430では、上記複数の入力状態量を入力して、次期標本化時期において、論理判定部420で求められた次期標本化時期における論理値に応じて選択された入力状態量が出力状態量として出力される。

この非線形特性再現プログラム410は、後述するように、例えば相対移動可能状態と相対移動不能状態とを有する2つの部材を含む機構の特性の再現、相対的に滑った滑り状態と相互に接続された接続状態とを有する2つの部材を含むクラッチ機構の特性の再現、駆動軸に制動エネルギーを加えるブレーキ機構の特性の再現、および可動部材にバネを作用させて該可動部材への外力の付加が解除されたときに該可動部材が該バネの作用により初期状態に自動復帰するとともに該可動部材の可動範囲を制限するストッパが設けられてなる自動復帰機構の特性の再現等に好適に適用される。

図10は、本発明の第4の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態を示すものであり、この記憶媒体500には、状態変動推定部520、状態偏差検出部530、安定状態判定部540、および状態量切替部550を有する非線形特性再現プログラム510が記憶されている。

この非線形特性再現プログラムは、コンピュータを、所定の第1の状態量を入力し、入力した第1の状態量が所定状態にあるか否かに応じて非線形に切り替えられた第2の状態量を出力する非線形特性再現装置として動作させるものである。

ここで、状態変動推定部520では、上記第1の状態量の、現在の標本化時期から次期標本化時期に至る間の状態量変動幅の予測が行なわれ、

状態偏差検出部530では、上記第1の状態量の、現在の標本化時期における値と、その第1の状態量が所定状態にあるか否かを判定するための判定値との偏差が求められ、

安定状態判定部540では、状態変動推定部520で予測された状態量変動幅と状態偏差検出部530で求められた偏差との大小に基づいて次期標本化時期におけ

る非線形変化を予測した、複数の離散的な値の中から選択される論理値が求められ

状態量切替部550では、安定状態判定部540で求められた論理値に基づいて切り替えられた第2の状態量が出力される。

ここで、その具体的な態様によっては、状態偏差検出部530では、上記第1の状態量の現在の標準化時期における値と、その第1の状態量が所定の状態にあるか否かを判定するための、状態変動推定部520で予測された状態量変動幅の正負に応じて異なる判定値との偏差が求められる。

図11は、本発明の第5の非線形特性再現プログラム記憶媒体の一実施形態を示すものであり、この記憶媒体600には、線形モデル部620と非線形モデル部630と有する非線形特性再現プログラム610が記憶されている。この非線形特性再現プログラム610は、コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させるものである。

線形モデル部620は、線形系の特性を再現するものであり、この線形モデル部620には、設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に線形変換する状態量変換部621が含まれている。

また、非線形モデル部630は、線形モデル部620から、所定の第1の観測状態量の次期標準化時期の推定観測量を取得しその推定観測量に基づいて変換パラメータを生成して状態量変換部621に設定するものであり、この非線形モデル部630は、緩慢変化再生部631と特性生成部632とからなり、本実施形態ではさらに、緩慢変化再生部631は、定常値設定部631aと正規化応答部631bとからなる。

緩慢変化再生部631では、線形モデル部620から上記第1の観測状態量と同一もしくは異なる所定の第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測値が取得され、その第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、相対的に緩慢な挙動変化を示す第1の非線形系の特性が反映された緩慢変化状態量が生成される。

この緩慢変化再生部631のうち、定常値設定部631aでは、上記第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、上記緩慢変化状態量の、線形モデル部620の状態が現状のまま継続したとした場合の無限時間経過後の定常値が求

められ、正規化応答部 6 3 1 b では、定常値設定部 6 3 1 a で求められた緩慢変化状態量の定常値と、既知の、第 1 の非線形系における緩慢変化状態量の正規化された時間変化特性とに基づいて、その第 1 の非線形系の特性が反映された、特性生成部 6 3 2 に渡す緩慢変化状態量が生成される。

また、特性生成部 6 3 2 では、線形モデル部 6 2 0 から取得した上記第 1 の観測状態量の次期標本化時期の推定観測量と、緩慢変化再生部 6 3 1 で生成された緩慢変化状態量とに基づいて、相対的に急激な挙動変化を示す第 2 の非線形系の特性が反映された変換パラメータが生成されて状態量変換部 6 2 1 に設定される。

この非線形特性再現プログラム 6 1 0 は、例えば温度変化に応じて抵抗値が変化する素子を有する系の特性の再現等に好適に用いられる。

次に、図 5 に示すコンピュータに、図 7～図 1 1 に示す非線形特性再現プログラムがインストールされることによりそのコンピュータ内に実現された、本発明の非線形特性再現装置としての各種の機能について説明する。

尚、以下において説明する機能ブロックでは、図 7～図 1 1 に示したソフトウェア上の各機能ブロック（ソフトウェア部品）と同一の名称が使われているが、以下に説明する非線形特性再現装置としての機能ブロックは、その機能を実現するためのソフトウェア上の機能ブロックとハードウェア上の構成要素との複合を指し、図 7～図 1 1 に示したソフトウェア上の機能ブロックは、その機能を実現する要素のうちの、ハードウェアや OS（オペレーションシステム）などを除いたソフトウェア（アプリケーションソフトウェア）を指している。

図 1 2 は、本発明の第 1 の非線形特性再現装置の原理的な一実施形態を示す説明図である。尚、この図 1 2 は、本発明の第 1 の非線形特性再現装置の原理を解り易く説明するための図であり、本発明の第 1 の非線形特性再現装置は、この図 1 2 およびその図 1 2 の説明に限定されるものではない。

図 1 2 の右側は、状態変換部 R が抵抗係数・電気容量・質量・リンク伝達係数などの特性値、入出力状態量 $v \cdot f$ が電圧・速度・力・電流・などの状態量である。この状態変換部 R は、入力状態量 v を出力状態量 f に変換する。また、同図の右側の非線形特性再生部には、状態量変換部に加えられている入力状態量 v の次期標本化時期における推定観測量 v_{-} （白抜き記号）と、その他の外部状態量 $v_1 \cdot f$

、 S_1 が外部信号 S_1 が入力される。これらの入力状態量によって非線形特性再生部内部には、次期標本化時期の出力状態量の推定値 $f_- = (v_-, v_1, S_1, f_1)$ が生成される。この出力状態量 f_- を前記の推定観測量 v_- で除算又は微分して、次期標本化時期における状態変換部の特性 R_0 の予測値を生成する。この R_0 を状態変換部 R に代入（点線の矢印）した後に、状態量変換部が組み込まれた全系モデルの計算を実行する。この操作を標本化時期毎に繰り返し実行することで、製品や部品の非線形な物理現象や振る舞いを時刻暦データとして再現できる。

（事例説明）

1. 流動蓄積要素（円錐バネ）

（1）機能モデル

図13は、線形の流動蓄積要素（基本機能要素）に、変形量と共に変化するバネのこわさをグラフ表現した機構モデルの例である。同図は、速度 v_1 と v_2 ・外力 f_1 と f_2 ・内部状態量 x の線形機能モデルである。また、 v_1 はバネの変形速度差を示す。また、同図に組み込まれている機構モデルは、バネのこわさ K_d が変形量 δ の関数になっていることを示すグラフである。このグラフにより線形のバネから非線形バネまで表すことができる。尚、図中の δ_0 はオフセット荷重を生成する撓み量である。

図13の流動蓄積特性は、下記の支配方程式と結合条件式で表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -K & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ x \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \\ v_d &= V_i \\ K &= K_d \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

図13のバネのこわさの機構モデルは、下記の数学モデルで表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \int v_d dt \\ K_d &= fnc(\delta + \delta_0) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(14)は、1行目が速度差を積分したバネの撓み δ を表し、2行目に fnc (a)が非線形バネのこわさ K_d を決める関数である。

(2) 機構モデル(非線形バネモデル)

非線形バネの代表的な例に、円錐バネがある。図14(a)に等ピッチに巻かれた円錐バネの構造を示し、同図(b)は撓み δ と荷重 F の関係を表すグラフである。図中の記号は、 H_0 が自由長、 R_1 が小さい側の有効半径、 R_2 が大きい側の有効半径、 d がコイルの径、 P がコイルのピッチを表している。またバネは、自由長の巻数を n 、横弾性係数を G とする。

図14(a)において円錐バネは、径の大きい側のねじりモーメントが大きく撓み易いことから、コイル同士の接触が径の大きい側から順次始まる。同図(b)において、バネ特性としては、接触前の0～A間では撓み δ と荷重 F の関係が比例し、接触後のA～B間では有効巻数が減少して撓み δ に対する荷重 F が増加する。最後にB点では小さい径側が接触して底突きを起こし剛体となる。

この円錐バネについては、良く知られているので参考文献から関係式を引用する。荷重 F と撓み δ には、次の関係がある。

<接触前のバネ荷重と撓み(線形域)>

$$\delta = \frac{16n}{Gd^2} (R_2^2 + R_1^2) (R_2 + R_1) F \quad (15)$$

<接触後のバネ荷重と撓み(非線形域)>

$$\left. \begin{aligned} R &= R_2 - (R_2 - R_1) \frac{n'}{n} \\ d' &= d \sqrt{1 - \left(\frac{R_2 - R_1}{nd} \right)^2} \\ F &= \frac{Gd^4}{64R^3} (p - d') \\ \delta &= \frac{n}{R_2 - R_1} \left\{ \frac{16(R^4 - R_1^4)}{Gd^4} F + (p - d')(R_2 - R) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(16)は接触後の非線形域を表し、1行目が R_2 側から n' 番目のコイルが接触した時の平均半径 R の近似式、2行目が接触したコイル間の上下方向の中心距離 d' 、3と4行目が荷重 F と撓み δ の関係を表す。式(15)・式(16)の円錐パネの式から図13に組み込む機構モデルについて、モデル化を行う。

式(16)の各式を整理して式(15)の線形式を荷重比 Φ で非線形化する式は、次のようになる。

$$F = K \frac{1}{\Phi} \delta \quad (17)$$

$$K = \frac{Gd^2}{16n(R^2 + R_1^2)(R_2 + R_1)} \quad (18)$$

$$\Phi = \left\{ 1 - \frac{4}{(R_2 - R_1)} \frac{R^3(R_2 - R)}{(R^2 + R_1^2)(R + R_1)} \right\} \frac{1}{d^2} \quad (19)$$

式(17)は円錐バネの荷重-撓み特性を表す式である。線形域のバネのこわさ K は、式(18)の R が R_2 となり、同式の荷重比が $\Phi=1$ となる。また、非線形域では、式(16)の1行目から接触するコイル毎に順次有効半径 R を求め、これを式(18)と(19)の R に代入して求める。この方法で求めた荷重 F と撓み δ の関係は、事前に計算しておき、推定速度 v_e を積分した撓み δ 検索して求めたバネのこわさ K_e を機能モデルの K に代入する。この関係を表した機能・機構モデルを図15に示す。

図15は、図13の機能モデルに円錐バネの機構モデルを組み替えたものであり、式(14)の2行目の関数が撓み δ からバネのこわさ K を検索する関数に置き換わる。

2. 空気ばねのモデル化例

流体系の例として、図16に示す自動車用エンジンの圧縮・膨張工程を模擬した空気圧シリンダのモデル化を行う。尚、圧縮・膨張に伴う内部エネルギー(温度エネルギー)のモデル化は省略する。

図16は、 p_0 が大気圧・ S がシリンダ断面積を表し、 M がピストン質量、 C が粘性抵抗係数、 K が空気ばね剛性、 D が内部減衰係数、 f がピストン外力、 v がピストン速度、 P がシリンダー内圧、 V がシリンダー容積である。同図は、ピストンには、外力 f の作用して、ピストン速度 v とこれに伴うシリンダ容積変化 ΔV_p が生じ、シリンダ内圧 p を発生する。このシリンダ内圧 p は、空気ばねの剛性 K としてピストンの反力として作用する。また、この内圧上昇は、シリンダ内の温度上昇を招き熱膨張した体積増加成分が内圧上昇成分の一部となる。この温度上昇は、内部減衰係数 D によって放熱されて、熱膨張した体積増加成分を減少させる働きをする。また、シリンダーの断熱と放熱は内部減衰係数 D が行なう。尚、シリンダー容積の初期状態は、内圧 p が大気圧 p_0 と等しい状態のシリンダ容積 V_0 とする。

(1) 機能モデル

この関係をまとめたピストンの圧縮・膨張工程は、図17で示す機能モデルとなる。シリンダーの断熱と放熱は、内部減衰係数 D が行なう。図17の機能モデル派、流動蓄積要素(基本機能要素)に空気バネの機構モデルが組み込まれたものである

。尚、温度上昇の機構モデルは省略する。

図 1 7 は、P がシリンダー内圧の観測量、 V_{p-} の 2 重の積分記号がピストン移動距離 x_{aa} のシリンダー容積（推定累積観測量）を求める。

図 1 7 の支配方程式・結合条件・推定観測量は、上から順に次式となる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M & 0 & -C & -S & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K} & S & -\frac{1}{D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_a \\ x'_c \\ x_{aa} \\ x_a \\ x_c \\ f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta V_{i-} = \Delta V_{p-} \\ K = K_s \end{array} \right\}$$

式 (20) の上側は、1～2 行目が状態方程式、3 行目が蓄積観測量の状態方程式で x_{aa} がピストン移動距離（蓄積位差量）、4 行目が入出力方程式、5 行目がシリンダー圧力の観測量 p の式を表す。下側は、機構モデルと接続する結合条件式で、 K_s が機構モデル側の空気ばね剛性、同様に V_{i-} がピストン移動距離の体積である。

(2) 機構モデル（空気ばねモデル）

図 1 7 の機構モデルについてモデル化すると、以下ようになる。

まず、同図のピストンの移動量で決まるシリンダー容積 V は、次のようになる。

$$\begin{aligned} V_{p-} &= \left(Sx_{aa} - \frac{1}{D}x_c \right) t_{smp} \\ V &= V_U - (Sx_{aa} + \Delta V_{p-}) \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)は、上側が容積変化の推定蓄積観測量、下側がシリンダーの体積の推定観測量である。尚、 t_{seg} は標本化周期である。

次に、圧縮前の状態から圧縮された状態の圧力 p と容積 V の関係をポリトロープ変化として表すと次式となる。式中の n は、指数である。

$$p = p_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^n \quad (22)$$

式中のポリトロープ変化を決める指数 n は、以下の値にすることで空気バネ剛性 K_s が多様に変換する。

$$\begin{aligned} n &= 0 : \text{等圧変化} \\ &1 : \text{等温変化} \\ &\kappa : \text{断熱変化} (\kappa \text{ は比熱比}) \\ &\infty : \text{等容変化} \end{aligned}$$

式(22)を変換した非線形パラメータは、次式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_c &= x'_c = K_s \Delta V_{p_-} \\ K_s &= p_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^n \frac{1}{\Delta V_{p_-}} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式(23)は、上側がシリンダ圧力変動 Δp と容積変化 ΔV_{p_-} の関係を空気バネ剛性 K_s で表わした線形式、下側が式(22)から容積 V における空気バネ剛性 K_s の非線形式である。この両式によってモデルは、線形と非線形を分離して互いが独立した関係となる。

空気バネ剛性 K_s は、式(23)を体積変化で微分して求めることができる。数値計算としては、同式を直接使用する方法、テーラー展開する方法などがあり、前者は P_0 と P 間の圧力変化が少ないときの便法で、後者は変動が大きいときの近似式に適する。前者について、現在を (k) とし次期標本化時期を $(k+1)$ とする離散化式で表すと、式(23)は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{(k+1)} &= K_{S(k+1)} \Delta V_{p(k+1)-} \\ K_{S(k+1)} &= p_0 \left(\frac{V_0}{V_{(k+1)}} \right)^n \frac{1}{\Delta V_{p(k+1)-}} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

式 (2.4) は、 $V_{(k+1)}$ が推定容積、 $\Delta V_{p(k+1)-}$ が容積変化である。同式をテーラ展開した式は、次のようになる。

ここで、 j は展開の回数で $0 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots$ とする。

(3) シミュレーション結果

図 17 の機能モデルを表 1 の各特性値で行ったシミュレーション結果を、図 18 と図 19 に示す。尚、空気のパネ剛性 K_s は、式 (25) を適用した。

【表 1】

空気圧シリンダーの特性値

特性名	記号	単位	特性値
質量	M	[kg]	100.0
粘性抵抗係数	C	[N/(m/s)]	1000.0
内部減衰係数	D	[N/(m/s)]	3×10^9
空気の比熱比	K		1.4
断面積	S	[m ²]	0.01
シリンダ容積	V_0	[m ³]	0.001
大気圧	p_0	[Pa]	0.1×10^6

図 18 は各状態量の時刻歴変化を示し、図 19 はシリンダー容積 V に対する圧力 p と速度 v の関係を表す $P-V$ 線図と $v-V$ 線図である。両式は、実線が内部減衰係数を $D=0$ とした断熱状態、点線が $D=3 \times 10^9$ [N/(m/s)] とした放熱状態である。シミュレーションは、 3000 [N] の外力 f をステップ状に与えた結果で、非線形減衰振動が収束する過程について行った。図 18 は、一番上側がシリンダーの内圧 p [Pa]、次がピストン速度 v [m/s]、一番下がシリンダー容積 V [m³] の応答特性を表す。各特性に共通して、空気のパネ剛性 K [Pa/m³] の非線形性により減衰振動波形に歪みがあることが判る。また、放熱状態では、シリンダー容積 V [m³] から熱収縮による体積変化が現れている。

図 19 の上側は、シリンダ容積 V [m³] とピストン速度 v [m/s] の収束過程の関係を表し、渦巻状に収束した中心が定常状態である。下側は、シリンダ容積 V [m³] とシリンダー内圧 p [Pa] の関係を表わし、空気のパネ剛性 K が非線

形特性であることを表す。また、放熱状態では、圧力に関係無く熱収縮による体積変化を起こすことが判る。

3. 係数要素（揺動機構）

非線形係数要素の代表例として、リンク機構がある。この非線形係数のモデル化は、係数要素（基本機能要素）の係数を非線形にする機構モデルの組み込みで実現できる。そのモデル化の例として図20に示す回転運動を揺動運動に変換する揺動機構について検討する。

図20は、回転節 A_1 と揺動節 A_2 から成る揺動機構の構造モデルである。ここで、 R は節長（半径）・ θ は回転角・ f は連結点の作用力・ v は連結点の速度・ T はトルク・ ω は角速度である。添字1と2は、それぞれの回転節と揺動節を意味する。 L_0 は回転中心間の距離である。また、 R_1 は一定であるが、 R_2 は運動と共に変化する。尚、両節は剛体とし、慣性モーメントと回転抵抗は無視する。

(1) 機能モデル

モデル化にあたり、基本機能要素の係数を非線形伝達係数 Φ とする機能モデルは、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= \Phi T_1 \\ \omega_1 &= \Phi \omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

次に式(26)の非線形伝達係数 Φ に組み込む機構モデルのモデル化を行う。揺動機構の機構モデルは、その係数を決定する回転角を回転節 A_1 の回転角 θ_1 または揺動節 A_2 の回転角 θ_2 にするかで非線形伝達係数 Φ が異なり、回転角 $\theta_1 \cdot \theta_2$ に対応した非線形伝達係数 $\Phi_1 \cdot \Phi_2$ は互いに逆数関係となる。

(2) 機構モデル1（回転節入力の揺動モデル）

まず図21は、揺動節 A_2 の角速度 ω_2 で非線形伝達係数 Φ_2 を決める機構モデルが組み込まれた機能モデルである。尚、機構モデルの ω_2 は推定角速度、 θ_2 は推定角度である。

図21の支配方程式と結合条件式は、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ T_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\Phi_a \\ \Phi_a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \\ \omega &= \omega_2 \\ \Phi &= \Phi_a \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

図 2 1 の非線形伝達係数 Φ_a は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{2-} &= \int \omega_- dt \\ \Phi_a &= 1 - \frac{L_0 \cos(\pi - \theta_{2-})}{\sqrt{R_1^2 - L_0^2 \sin^2(\pi - \theta_{2-})}} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式 (28) は、上側が揺動節 A_2 の推定回転角 θ_{2-} 、下側が非線形伝達係数 Φ_a である。尚、同式の下側は、全てのパラメータが形状を表すので、図 2 1 では形状モデルの 8 角形の枠となっている。また、式 (28) の右辺分母が 0 の時は、揺動節 A_2 が最大揺動回転角 θ_{2_max} となり非線形伝達係数 Φ_a は ∞ となる。この最大揺動回転角 θ_{2_max} は次式となる。

$$\theta_{2_max} = \sin^{-1} \left(\frac{R_1}{L_0} \right) \quad (29)$$

尚、この時の揺動節長 R_2 は次式となり、上側が回転節 A 1 の回転角 θ_1 、下側が揺動節の回転角 θ_2 で表した式となる。

$$\begin{aligned} R_2 &= \sqrt{L_0^2 + R_1^2 - 2L_0R_1 \cos \theta_1} \\ &= L_0 \cos(\theta_2) - \sqrt{R_1^2 - L_0^2 \sin^2(\theta_2)} \end{aligned} \quad (30)$$

式(28)・(30)は、図20で示す機構の幾何学的関係と連結点の荷重と速度ベクトルから、簡単に導くことができる。

(3) 機構モデル2 (揺動節入力の揺動モデル)

次に、回転節A₁の角速度 ω_1 を観測量にする非線形伝達係数 Φ_b を組み込んだ機能モデルを図22に示す。尚、同図は、図21と双対関係となる。図22は、駆動側の回転節A₁に慣性モーメントJを、負荷側の揺動節A₂に抵抗係数Cの付加機能を接続している。また外部からはトルクT₁を慣性モーメントJに与えて角速度 ω_1 を出力している。

図22の機能モデルは、次の支配方程式と結合条件式で表すことができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ T_2 \\ 0 \\ \theta_{1-} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{ccccc} -J & -\Phi_b^2 C & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_b C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ t_{smp}^2 & t_{smp} & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} x'_{1J} \\ x_J \\ T_i \\ x'_{BB} \\ x_{BB} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \omega = \omega_1 \\ \Phi = \Phi_b \end{array} \right\}$$

(31)

式(31)は、1～2行目が状態方程式と入出力方程式、3～4行目が観測方程式、5～6行目が回転角 θ_1 を推定観測方程式である。尚、式中の x'_{BB} と x_{BB} は、角速度 ω_1 の内部蓄積観測量である。図42の非線形伝達係数 Φ_b の機構モデルは、次式となる。

$$\Phi_b = \frac{R_1^2 - R_1 L_0 \cos(\theta_{1-})}{R_1^2 + L_0^2 - 2R_1 L_0 \cos(\theta_{1-})} \quad (32)$$

式(32)の下側は、式(28)と同様に形状モデルである。

(4) シミュレーション結果

次に、図 2 2 の機能モデルに表 2 の揺動機構の特性値を与えた時のシミュレーション結果を、図 2 3 と図 2 4 に示す。

【表 2】

揺動機構の特性値

特性名	記号	単位	特性値
慣性モーメント	M	$[N/m^2]$	0.1
抵抗係数	C	$[N/(m/s)]$	0.3
回転節の半径	R_1	$[m]$	0.02
回転中心間の距離	L_0	$[m]$	0.05

図 2 3 は、外部から $0.05 [Nm]$ のトルク T_1 をステップ状に加えた時の各状態量の応答特性で、上側が回転節の角速度 $\omega_1 [rad/sec]$ 、次が揺動節の角速度 $\omega_2 [rad/sec]$ 、最後が揺動節のトルク $T_2 [Nm]$ である。各状態量とも、非線形係数 Φ_0 によって歪みを持った波形となっている。

図 2 4 は、非線形係数 Φ_0 の角度に対する伝達特性の線図で、図 2 3 の状態量の歪みは、この線図が示す伝達特性によって決定されている。図中の矢印は、回転節 A 1 が反時計方向に回転した時の非線形伝達係数 Φ_0 の変化方向を表しており、当然、時計方向の回転では矢印が逆方向になる。

4. 摩擦のモデル化例

非線形な側負荷の代表的な例に摩擦がある。質量 M に摩擦力 F_f が作用する摩擦の機構モデルを図 2 5 で示す。図 2 5 は、外力 $f_1 \cdot f_2$ が摩擦力 F_f を受けながら面上を速度 $v_1 \cdot v_2$ で移動する質量 M の構造モデルを示す。この摩擦力 F_f は、定数となる静摩擦力 F_s と速度の関数となる動摩擦力 F_d から成り立つものとする。

(1) 機能モデル

図 2 6 は、位差蓄積要素の質量 M に摩擦力を発生する側負荷 F_f を加えた機能モデルとして表されている。そして、この側負荷 F_f には、摩擦力を生成する機構モデルが組み込まれている。図 2 6 の機構モデルは、質量 M の速度（内部状態量 x ）と加速度 f_s の推定観測量から生成した摩擦力 F_f を生成する。また、出力速度 v_s 側には

、抗力 f_2 を発生する抵抗係数 C を負荷として追加している。

図 2 6 から求めた機能モデルの支配方程式と結合条件式は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ v_1 \\ f_2 \\ f_{a-} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -M & -C & 1 & -F_v \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & -C & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ x \\ f_1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ v &= x \\ f &= f_{1-} + f_{2-} \\ F_f &= F_v \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

式 (3.3) は上から順に、1 行目が支配方程式、2 行目が入出力方程式、3～4 行目が抵抗係数の抗力 f_2 と加動力 f_{a-} の推定観測方程式である。同式下側の結合条件式は、1 行目が速度の観測量、2 行目が質量に加わる推定加動力、3 行目が摩擦力である。

図 2 6 の機構モデルは、下側が静摩擦力 F_s を生成するモデル、上側中央が動摩擦力 F_v を生成するモデル、左端が静摩擦力 F_s と動摩擦力 F_v を切替えて代入量 F_f を出力するモデルである。右端には、速度に依存する動摩擦力 F_v の特性がグラフ表現で組み込まれ、動摩擦力 F_v が速度 v に無関係に一定値となる場合は、グラフは不要となる。また、この摩擦特性のグラフは、高い静摩擦力から低い動摩擦力に変化することを示し、摩擦面のステック現象や微速度領域の摩擦変化を負抵抗と見なした振動現象が再現できる。

(2) 機構モデル (摩擦モデル)

静摩擦力 F_s と動摩擦力 F_v の切り替えは、速度 v の判定条件 S_w によって切り替える。切り替えは、 $S_w = 0$ を停止状態として静摩擦力 F_s を選択し、 $S_w = 1$ を移動状態として動摩擦力 F_v を選択する。機構モデルは、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} & \text{if } (v_s = 0) \text{ then } (S_{wv} = 0) \text{ else } (S_{wv} = 1) \\ & F_i = F_{Mi} S_{wv_1} + F_{Si} S_{wv_0} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

式(3.4) 2行目は、 F_{Mi} が動摩擦力、 F_{Si} と F_{Si} が静摩擦力、 F_s と v_s が速度 v である。また、スイッチ変数の添え字0と1は、切替スイッチのNOスイッチ側とNCスイッチ側を示す。式(3.4)の上側の判定条件式を零速度に収束させる判定法で表すと次のようになる。

$$\text{if } \left(|v_{S(k)}| < |v_{S(k)} - v_{S(k-1)}| \right) \text{ then } (S_{wv} = 0) \text{ else } (S_{wv} = 1) \quad (3.5)$$

式(3.5)は、 $v_{S(k)}$ が現在の速度、 $v_{S(k-1)}$ が標本化周期1つ前の速度、 Δv がこれから求めた速度変化幅である。条件判定 S_{wv} の判定結果は、式(3.4)と同じである。

次に、静摩擦力 F_s を生成する数学モデルを導く。静摩擦力 F_s には、2つの振る舞いがあり、一つは加速力 f_s が静摩擦力 F_s 以下の時には、静摩擦力 F_s に釣り合った静摩擦力 F_s を反力として質量 M に与えて停止状態にしておくこと。今一つは静摩擦力 F_s 以上の加速力 f_s が加えられた瞬間、動摩擦力 F_d に切替え質量 M を起動させることである。この瞬間は、質量 M が停止状態なので動摩擦力 F_d の方向(符号)は加速力 f_s と同一方向(符号)とし、質量 M へは側負荷 F_s を負の値にして反力にする。この両者の切り替えは、加速力 f_s と側負荷 F_{s0} の差 $Y_f = |f_s| - F_{s0}$ の条件判定 S_{wv} で操作する。切り替えは、停止の釣り合い状態を $S_{wv} = 0$ として加速力 f_s 側を選択し、動く瞬間を $S_{wv} = 1$ として静摩擦力の側負荷 F_{s0} 側を選択する。この機構モデルは、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} & \text{if } \{|f_S| - F_{S0}\} > 0 \text{ then } (S_{WY} = 1) \text{ else } (S_{WY} = 0) \\ & F_S = f_S S_{WY=0} + F_{S0} S_{WY=1} \left(\frac{f_S}{|f_S|} \right) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

式(36) 2行目の加算力 f_s を $|f_s|$ で除算しているのは、摩擦の方向(符号)を決める。最後に動摩擦 F_M を生成する機構モデルについてモデル化する。動摩擦力 F_M は、動摩擦力の側負荷 F_{M0} に速度 v の符号を加えて生成する。この機構モデルは、次のような式になる。

$$F_M = F_{M0} \left(\frac{v}{|v|} \right) \quad (37)$$

式(36)の静摩擦力 F_{S0} と式(37)の動摩擦力 F_{M0} は、速度 v によるグラフ検索で求めるソフトウェアまたは数学モデルを必要とする。

以上の各機構モデルは、次の結合条件式で結合する。

$$\left. \begin{aligned} v &= v_S = v_v = v_f \\ F_M &= F_{Mi} \\ F_S &= F_{Si} \\ F_{S0} &= F_{M0} = F_g \\ f &= f_S \\ F_f &= F_F \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

(3) シミュレーション結果

図26の機能モデルを表3で示す各特性値で行ったシミュレーション結果を図27に示す。尚、速度 $v = 0$ の判定は式(35)で行い、動摩擦力 F_{M0} は一定値とした。

【表 3】

摩擦の特性値

特性名	記号	単位	特性値
質量	M	[kg]	0.1
抵抗係数	C	[N/(m/s)]	0.5
静摩擦力	F_{s0}	[N]	0.5
動摩擦力	F_{M0}	[N]	0.1

シミュレーションは、単位時間当たり 0.5 [N/sec] で上昇する外力 f を 1 [N] まで与え、 4 [sec] からは同じ変化率で逆に -1 [N] までの外力を与えて、 10 [sec] で外力を除いた。図 27 は、一番上が外力 $f_1 \text{ [N]}$ 、2 番目が速度 v_1 、3 番目が側負荷で与えた摩擦力 $F_v \text{ [N]}$ ・4 番目が抵抗係数 C の抗力 f_2 である。尚、摩擦力 F_v と抗力 f_2 は、観測量である。

図 27 において、外力 f_1 をゆっくり加えると静摩擦力 F_v が発生して外力 f_1 を打ち消し質量 M が動かない。 1 [sec] の点から、外力 f_1 が摩擦力 F_v を上回り質量 M が動き始め一定の動摩擦力 F_v が発生して定常状態に達する。 4 [sec] の点からは外力 f_1 をゆっくり低下させ、 6 [sec] 前後で再び静摩擦力 F_v が発生し一旦質量 M は停止する。更に、逆方向に外力 f_1 を加えると、質量 M は逆方向に動き始め動摩擦力 F_v が発生する。最後に、外力 f_1 を除くと、質量 M は速度 v_1 を低下させて停止する。停止の際は、質量 M の慣性力による速度が抵抗係数 C を介して抗力 f_2 として現われ、これに対する静摩擦力 F_v が発生し、しばらくして停止する。停止後は、摩擦力 F_v が無くなる。

5. 位差蓄積要素（可変慣性モーメント）

慣性モーメントが非線形になる機構として、遠心ガバナールおよび遠心クラッチなどの機械要素がある。図 28 は、このような機構要素の例を表した図である。

図 28 は、図示方向を正回転とするトルク T_i が作用して角速度 ω を発生している。同図の回転系は、移動可能な可動質量 M_θ が遠心力を受けて並進する系を組み合わせた構造モデルである。この可動質量 M_θ は、半径 R_θ の円周上を回転し、遠心力 F_c 。

が作用して外側に速度 V_e で移動する機構となっている。この回転系は、トルク T_l を受けて角速度 ω_l 回転するとき、可動質量 M_m の円周方向の速度を V_m ・円周方向の慣性力を F_m とする。可動質量 M_m の回転半径 R_m の下限（停止位置）は R_0 である。並進系は、可動質量 M_m が回転することにより遠心力 F_c が生じ、バネのこわさ K_s に抗して粘性抵抗係数 C_s の抵抗力を受けながら、速度 V_e で L_m だけ移動して回転半径 R_m になる。この回転半径 R_m の変化は、回転系の慣性モーメント J を変化させる。可動質量 M_m は半径 R_0 まで移動すると剛性 K_s のストッパに接触し、移動しなくなる。尚、可動質量 M_m を除く支持腕の慣性モーメントを J_0 とし、バネのこわさ K_s は質量を有しないものとする。尚、停止位置 R_0 の剛性は考慮しない。

(1) 機能モデル

この可変慣性モーメント機構の特徴は、質量 M が遠心力 F_c によって慣性モーメント J を変化させることである。従って、機能モデルの基本構成は、位差蓄積要素（基本機能要素）の慣性モーメント J に、回転系の推定角速度 ω_{l-} の観測量による遠心力 F_c で移動した可動質量 M_m の移動距離 L_m の変動分を加えた慣性モーメント J_m を代入する機構モデルを有する。そして、遠心力 F_c により移動する可動質量 M_m の機能モデルが、この機構モデルの中に包含される。この関係を表した回転軸の機能・機構モデルを、図29に示す。尚、図29には、位差蓄積要素の基本要素に粘性抵抗係数 C が追加されている。また、図中の質量 M_m の出力位差系には、移動速度 V_m の位差量と回転半径 R_m の蓄積位差量が包含されている。

図29で示す機能モデルの支配方程式と結合条件は以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_l \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -J & -C & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_J \\ x_J \\ T_1 \end{bmatrix} \\ \omega_l &= \omega_{l-} \\ J &= J_m \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

(2) 機構モデル（遠心力モデル）

図29の機構モデルは、回転系と並進系を結合する回転並進変換、可動質量 M_m の

並進運動、可動質量 M_m の回転半径 R_m を決める、可動質量 M_m のストッパーの機能で構成されている。

まず、回転並進変換の機構モデルは以下の数学モデルとなる。

$$\left. \begin{aligned} F_e &= R_m M_m \omega_I^2 \\ J_m &= M_m R_m^2 + J_0 \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

式(40)は、上側が回転系による可動質量 M_m の遠心力 F_e 、下側が遠心力で変動する慣性モーメント J_m である。

次に遠心力 F_e で可動質量 M_m が並進運動する機能モデルは、次の支配方程式となる。

$$\left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ V_e \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc} -M_m & 0 & -C_m \\ 0 & -\frac{1}{K_m + K_s S_{HS}} & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x'_m \\ x'_k \\ x_m \\ x_k \\ F_e \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{c} 0 \\ L_{m_imp} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccc} 0 & -1 & 1 & 0 \\ t_{imp}^2 & 0 & t_{imp} & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x'_m \\ x'_L \\ x_m \\ x_{LL} \end{array} \right] \quad (41)$$

式(41)の上側は、並進運動の支配方程式で図29の K_m と K_s を積分量の加算結合で統合している。同式の下側は、可動質量 M_m の蓄積位差を移動距離 L_m で表した推定観測量である。尚、 t_{imp} は標準化周期である。

同式から回転半径 R_m の推定観測量は、次式となる。

$$R_m = R_0 + L_m \quad (42)$$

最後に、可動質量 M_m の移動を制限するストッパーは、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} L_S &= R_S - R_m \\ \text{if } (L_S \geq 0) \text{ then } (S_{WS} &= 1) \text{ else } (S_{WS} = 0) \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

式(4.3)のストッパーに接触した時の条件判定は、非接触状態を $S_{WS}=0$ とし、接触状態を $S_{WS}=1$ とする。

これらの機構モデルを全体機構モデルとして組み立てる結合条件は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} V_e &= V_m = V_S \\ F_e &= F_{ei} \\ F_m &= F_S \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

(3) シミュレーション結果

図2.9の機能モデルについて、表4で示す特性値を使って行なったシミュレーション結果を図3.0に示す。

【表4】

可変慣性モーメントの特性値

特性名	記号	単位	特性値
回転系 慣性モーメント(支持腕)	J_o	[N/sec ² /rad]	0.01
粘性抵抗係数	C	[N/(m/sec)]	2.5
並進系 可動質量	M_m	[N/sec ² /m]	0.2
粘性抵抗係数	C_m	[N/(m/sec)]	10.0
ばねこわさ	K_m	[N/m]	2.0
ストッパー剛性	K_S	[N/m]	1.0×10^4
回転半径下限	R_o	[m]	0.1
回転半径上限	R_S	[m]	0.5

図30において、シミュレーションは、最初に入力トルク $T_1 = 20$ [N]を加え、0.4 [sec]後に逆方向に $T_1 = -20$ [N]を加えて逆回転させ、再び0.9 [sec]後に正方向に $T_1 = 20$ [N]を加え、約1.45 [sec]付近でストッパーに接触した。図30の結果は、上から順に回転系の角速度 ω_1 [rad/sec]・可動質量 M_a に作用する遠心力 F_c [N]・移動速度 V_s [m/sec]・バネとストッパー剛性力 F_s [N]、最後が可動質量 M_a の回転半径 R_a [m]である。

シミュレーション結果は、入力トルク T_1 の切替で可動質量 M_a の遠心力 F_c が瞬間0になり、再び復帰する。また移動速度 V_s は切り替えの瞬間に低下するが復帰し移動を継続し、回転方向に無関係なことを示している。そして回転半径 R_a が0.5 [m]になった所でストッパーに接触している。接触状態では、衝突による反発から移動速度 V_s とストッパー剛性の K_s の力 F_s に減衰振動が発生している。この時の F_s の減衰振動波形は、下側が平坦になっている。これは、可動質量 M_a がストッパーに接触した瞬間の反発力であることが判る。

図31は、本発明の第2の非線形特性再現装置の原理説明的な一実施形態を示す図である。尚、この図31は、本発明の第2の非線形特性再現装置の原理を解り易く説明するための図であり、本発明の第2の非線形特性再現装置は、この図31およびその図31の説明に限定されるものではない。

この図31には、本発明の第1の非線形特性再現装置の考え方を全体の系に適用する時のモデル構成を示す。従来の非線形のモデル化では、各特性や係数など出力状態量が入力状態量の指数・対数・2乗などの関数値に支配されるため、複数の非線形な物理現象を数学的にモデル統合して解くことは困難であった。しかし、この方法を利用すると、各非線形な物理現象を生成するパラメータ（特性・係数・側付加）が、計算を実行する前に状態量変換部 $R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$ の予測値を求めてセットアップするので、全系モデルを実行する瞬間では、状態量変換部 $R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$ の特性値を線形と見なして計算することができる。

（事例説明）

6. ゼネバ機構

（1）基本機能

揺動リンク機構を応用した機械要素の一つに、送り装置などの間欠動作を行うゼ

ネバ機構がある。ゼネバ機構は主部と従部からなり、主部は揺動リンク機構の回転節が対応し、従部には揺動節に対応して円周側に開いた溝があり、主部の連結軸が従部の溝と勘合して、主部の回転により従部が停止と回転運動を間欠的に行う。このゼネバ機構を、図3-2に示す。

図3-2のゼネバ機構は、主部と従部にトルク $T_p \cdot T_s$ と角速度 $\omega_p \cdot \omega_s$ が与えられ、慣性モーメント $J_p \cdot J_s$ と粘性抵抗係数 $C_p \cdot C_s$ を持っている。また、同図の L_s は節間の距離、 R_s は連結軸の回転半径である。主部に回転トルク入力 T_p を与えると、従部連結溝の連結角 α の位置に主部連結軸の回転角度 β_s がきたとき、両者は噛み合い従部を駆動する。そして、従部が連結角 2α まで回転すると連結が外れて従部は停止する。この停止状態では、従部の半円形の切欠きと主部の円弧形状が噛み合い、従部は回転できない構造になっている。尚、主部の1回転に対する従部の間欠動作数は、従部に設けられた連結溝数 N によって決まる。

(2) 機能モデル (ゼネバモデル)

図3-2の構造をモデル化した機能・機構モデルを図3-3に示す。同図の T_p と ω_p が主部の駆動トルクと回転角速度で、 T_s と ω_s が従部の駆動トルクと回転角速度、 θ_s の観測量は従部の回転角である。図3-3の機能モデルは、主部に慣性モーメント J_p ・粘性抵抗係数 C_p を持ち、従部にも慣性モーメント J_s ・粘性抵抗係数 C_s を持っている。この主部の角速度 ω_p は、伝達係数 ϕ を介して非線形剛性 K に加えられ、トルクに変換して従部に伝えられる。また、このトルクは伝達係数 ϕ を介して主部に負荷トルクとして返される。図3-3の機能モデルの支配方程式は、次のようになる。尚、図中の x は内部状態量を示す。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_p \\ \omega_s \\ \theta_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_p & 0 & 0 & 0 & -C_p & -\Phi S_w & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K} & 0 & 0 & \Phi S_w & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -J_s & 0 & 0 & 1 & -C_s & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \omega_p & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \theta_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ x'_K \\ x'_s \\ x'_\phi \\ x_p \\ x_\phi \\ x_K \\ x_s \\ x_\theta \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix}$$

(4-5)

図33の機構モデルは、構造非線形なので主部の回転角 β_w を推定観測量として求め、慣性モーメント J_w の出力位差量に包含させる。回転角 β_w は、次式となる。

$$\beta_w = \int x_p dt \quad (46)$$

機能モデルに機構モデルを入れ子にする結合条件式は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \beta_w &= \theta_B \\ \Phi_Z &= \Phi \\ K_Z &= K \\ S_{ws} &= S_w \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

(3) 機構モデル（間歇運動モデル）

図33に組み込まれている機構モデルには、主部の回転角 β_w を決めて従部との連結を判定する結合条件 S_{ws} の機能、連結した時の連結剛性 K_z を決める機能、主部と従部間の伝達係数 ϕ_z を決める機能が包含されている。これらの各下位機構モデルは、次の結合条件式で水平展開される。

$$\beta = \beta_z = \beta_\phi \quad (48)$$

(a) 機構モデル（連結判定モデル）

式(47)の結合条件式から、式(46)の推定回転角 β_w は、機構モデルに推定回転角 θ_B として入力される。この推定回転角 θ_B は、従部の回転角度として $0 \sim 2\pi$ の角度範囲に変換できる。そして、この回転角 β は、式(48)によって各機構モデルに入力される。

$$\beta = 2\pi \left\lfloor \frac{|\theta_B|}{2\pi} - \text{int} \left(\frac{|\theta_B|}{2\pi} + 0.5 \right) \right\rfloor \quad (49)$$

式(49)の中の $\text{int}(a)$ は、 a の値の小数部を切り捨てて整数部を取り出す関数である。図32の構造モデルにおいて、主部の回転に対する従部の連結を連結角 α は、主部の連結軸に対する従部の連結溝数 N によって決まる、式は次のようになる。

$$\alpha = \frac{\pi}{N} \quad (50)$$

式(50)の従部の連結角 α に対する主部の連結角 α_p は、図32の幾何学的構造から次式を導くことができる。

$$\alpha_p = \cos^{-1} \left\{ \frac{L_z}{R_p} \left(\sin^2(\alpha) + \sqrt{\left(\frac{R_p}{L_z} \cos(\alpha) \right)^2 - \left(\frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right)^2} \right) \right\} \quad (51)$$

式(51) 連結角 $\pm \alpha_p$ の範囲内に主部の回転角 β がある時、主部と従部は、連結される。従って連結状態を判定する条件判定 S_{ws} は、次式となる。

$$\text{if } (\beta > \alpha_p) \text{ then } (S_{ws} = 0) \text{ else } (S_{ws} = 1) \quad (52)$$

式(52)は、 $S_{ws} = 1$ が連結状態・ $S_{ws} = 0$ が非連結状態である。

(b) 機構モデル(伝達係数モデル)

次に連結状態における主部と従部間の伝達係数 ϕ_s は、揺動機構と同じリンク機構の式となり、主部と従部の軸間距離 L_s ・主部の連結軸の回転半径 R_o と主部の回転角 β から求まる。数学モデルは、次のようになる。

$$\Phi_z = \frac{R_p^2 - R_p L_z \cos(\beta_\phi)}{R_p^2 + L_z^2 - 2R_p L_z \cos(\beta_\phi)} \quad (5.3)$$

式(5.3)の伝達係数 ϕ_z は、非連結時に図3.3で示すスイッチ変数 S_ϕ が0になって主部と従部を切り離す。

(c) 機構モデル（伝達剛性モデル）

最後に主部と従部間の非線形剛性 K は、主部の剛性・従部の剛性・接触の剛性を合わせたものである。連結時の非線形剛性 K は、主部の連結軸と従部の連結溝を介した剛性となり、主部の回転角 β_ϕ の関数で表せる。また非連結時には従部の連結溝の先端と主部の円弧形状と接触点の剛性になる。剛性が高いときは、定数として扱える。

(4) シミュレーション結果

図3.3の機能・機構モデルに表5の特性を使ってシミュレーションした結果を、図3.4と図3.5に示す。

【表 5】

主部	特性名	記号	単位	特性値
	慣性モーメント	J_p	[Kg ^m ²]	1.0
	粘性抵抗係数	C_p	[Nmsec/rad]	0.1
	回転半径	R_p	[m]	0.566
従部	慣性モーメント	J_s	[Kg ^m ²]	0.2
	粘性抵抗係数	C_s	[Nmsec/rad]	5.0
	連結溝数	N		4.0
連結	連結時の伝達剛性	K_z	[rad/Nm]	1.0×10^4
	軸間距離	L_z	[m]	0.8

図34は時刻暦で表わした結果を示し、図35は横軸を主部の回転角 β_w で表しである。図34は、上から順に $\omega_p \cdot \omega_s$ [red/sec] が主部と従部の角速度、 x_k [Nm] が非線形剛性Kのトルク、 S_w が条件判定である。また、図35は、横軸を主部の回転角 β_w [rad] で表し、縦軸は上側の $\omega_p \cdot \omega_s$ [red/sec] が図34と同じ角速度を示し、下側の θ_s [rad] が従部の回転角を示している。そして、シミュレーションは、主部の駆動トルク T_p に2.7 [Nm] をステップ状に加え従部には負荷トルク T_s を加えない場合の結果である。

図34において、スイッチ変数 S_s が1で連結したときは主部が従部を駆動し主部の角速度 ω_p は従部が負荷となって落ち込みが激しくなる。この時、従部の角速度 ω_s は急激に立ち上がるが、主部の落ち込みにより従部の角速度 ω_s も落ち込み、非線形剛性Kのトルク x_k は連結の衝撃でわずかに振動を発生している。また、連結終了時の条件判定 $S_s=0$ で従部は停止しするが、停止の衝撃でトルク x_k に少し振動が発生している。

図35は、従部の回転角 θ_s は主部の1回転(2π)毎に $\pi/2$ 単位で間欠的に動作し、非連結の時は回転角を維持していることが判る。

7. 残量警告灯のモデル化

一般の製品や部品の複雑な系では、緩慢な過渡応答を定常特性(静特性)がゆっくり変化する非線形と見なし、近似的に機構モデルに置き換えて、高速応答する線形機能モデルに組み込むことができる。その例に負特性抵抗素子の無接点スイッチ機能を利用した残量警告灯がある。

(1) 液位検出の原理

残量警告灯の部品構成と接続を図36に示す。残量警告灯の動作は、図36で示すタンク内の液面高さが L_0 より上のときは警告灯が消灯し、下になったとき点灯する至って簡単な系である。これに使用するサーミスタは、温度により抵抗値が変化する素子で、電子回路や温度計測に幅広く利用されている汎用的な非線形抵抗素子である。このシステムは、自動車の発進・停止や車体振動による液面の揺れによる警告灯のチラツキを防ぐ機能面と、低価格で高信頼性の品質面が要求されるが、これをサーミスタの非線形特性をうまく利用して解決している。

この系の回路図(構造モデル)を図37に示す。

図37は、 R_b が電池の内部抵抗・ E_0 が電池の内部起電力・ R_L が警告灯の抵抗・ R_T がサーミスタの抵抗である。そして、これらが直列に接続されている。状態量は、 V_b が電源電圧・ V_L が警告灯の端子電圧・ V_T がサーミスタの端子電圧・ I_b が3部品共通の電流である。

残量警告灯をモデル化するにあたり、サーミスタ抵抗 R_T が負荷の警告灯抵抗 R_L を操作する無接点スイッチの働きについて簡単に述べておく。 R_T と R_L の電圧－電流特性とその関係を図38に示す。

図38は、抵抗 R_L の電圧 V_L は電源電圧 V_b からの電圧降下と考え、原点を電圧軸上の V_b 点に移した逆方向の電圧－電流特性で表してある。また、 R_T と R_L の交点は、回路を流れる電流 I_b となり、交点の左側がサーミスタに加わる電圧 V_T 、交点の右側から V_b までが警告灯に加わる電圧 V_L となる。また、同図のサーミスタ抵抗 R_T は、低温で大きく高温で小さくなる抵抗特性を持っているので、抵抗値が大きい $R_{T,OFF}$ の交点がOFF状態となり、小さい $R_{T,ON}$ の交点がON状態になるスイッチとして働く。この両者は直列に接続されているので、OFF状態では電流 $I_{b,OFF}$ が漏洩電流、 $V_{T,OFF}$ がサーミスタによる遮断電圧、 $V_{L,OFF}$ が警告灯の消灯電圧となる。同様にON状態では、電流 $I_{b,ON}$ が点灯電流、 $V_{T,ON}$ がサーミスタの電圧降下、 $V_{L,ON}$ が警告灯の点灯電圧となる。

またサーミスタは、図37に示されているように常に警告灯を通して電流 I_b が流れ、 $V_T I_b$ 又は $I_b^2 R_T$ の消費電力 W_T によって自己発熱を起こし温度上昇を伴う。液位が高い時は、サーミスタが液中にあり発生した熱は周りの液で冷却されてサーミスタ抵抗 R_T が大きくなり、回路電流 I_b が小さいOFF状態となる。また、液位が下がって空中に出た時は、サーミスタが冷却されないので温度が上昇してサーミスタ抵抗 R_T が低下し、回路電流 I_b の増加に伴って消費電力 W_T が増加して加熱し、更に R_T の低下による I_b の増加を招き熱暴走を起こす。この熱暴走は、警告灯の抵抗 R_L による回路電流 I_b の抑制によって、ON状態に遷移するに従いサーミスタの端子電圧 V_T が小さくなって消費電力 W_T が低下し、サーミスタの自己発熱と放熱の平衡点でON状態を維持する。ここで警告灯の抵抗 R_L は図38に示すようにサーミスタとは逆に、電圧が低いときに抵抗が小さく高いときに大きくなる正特性の非線形性を持っている。残量警告灯は、この両者の静特性と負特性の非線形性を生かして、漏洩電流

の少ないOFF状態と電圧降下の少ないON状態を実現している。また前に触れた表示のチラツキについては、ON/OFF間を遷移するサーミスタの温度に対する応答遅れを利用して防止している。

(2) 機能モデル

以上の内容を整理してモデル化して機構モデルが組み込まれた機能モデルを図3-9に示す。

図3-9は、電池が内部抵抗 R_B を介して起電力 E_0 と端子電圧 V_B の差で電流を供給する電流源になっている。警告灯の抵抗 R_L は電圧に依存する機構モデルを持ち、サーミスタ抵抗 R_T は消費電力 W_T に依存する機構モデルを持っている。そして、自己発熱による温度上昇 T_s がサーミスタの出力位差量に包含されている。各機構モデルの詳細は、後で説明する。

図3-9から数学モデルを導くと、次のようになる。

電池の数学モデルは、次式となる。

$$I_B = \frac{1}{R_B}(E_0 - V_B) \quad (5.4)$$

警告灯とサーミスタによる直列回路の各端子電圧は、次のようになる。

$$V_B = (R_L + R_T)I_B \quad (5.5)$$

$$\left. \begin{aligned} V_T &= R_T I_B \\ V_L &= R_L I_B \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

式(5.4)・式(5.5)・式(5.6)を互いに代入して整理した結果は、次のようになる。

$$I_B = \frac{1}{R_B + R_L + R_T} E_0 \quad (5.7)$$

$$\left. \begin{aligned} V_T &= \frac{R_T}{R_B + R_L + R_T} E_0 \\ V_L &= \frac{R_L}{R_B + R_L + R_T} E_0 \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

式(57)と(58)から残量警告灯の支配方程式は、以下となる。

$$\begin{bmatrix} I_B \\ V_T \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_0 E_0 \\ R_T G_0 E_0 \\ R_L G_0 E_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \quad (59)$$

ここで、 G_0 は、次式で示す全系の総合コンダクタンスとする。

$$G_0 = \frac{1}{R_B + R_T + R_L} \quad (60)$$

式(59)は、状態方程式と入出力方程式を持たない観測方程式で構成された定常特性の式である。

(3) 機構モデル

(a) 警告灯の機構モデル

警告灯には、定格電圧12[V]・定格電力1.4[W]の自動車用白熱電球を使用する。表6にその仕様を示す。

【表6】 警告灯の仕様

	特性名	記号	単位	特性値
警告灯	電力	W_L	[W]	1.4
	電圧	V_L	[V]	14.0
	電流	I_B	[A]	0.1 ± 0.01
	光束	Φ_L	[lm]	90.0
サイズ	長さ	L	[mm]	19.5
	幅	W	[mm]	11.3
	高さ	H	[mm]	11.0

電圧－電流特性は、次式になることが知られている。

$$\frac{I_B}{I_S} = \left(\frac{V_L}{V_S} \right)^n \quad (6.1)$$

式(6.1)は、 V_S が特性を設定する基準電圧、 I_S が基準電圧 V_S における基準電流である。この式から警告等の非線形抵抗の式を導くと次のようになる

$$\frac{I_B}{I_S} = \frac{V_L}{V_S} \left(\frac{V_L}{V_S} \right)^{n-1} \quad (6.2)$$

式(6.2)をオーム則で整理した非線形抵抗の式は、次のようになる。

$$R_L = R_S \left(\frac{V_S}{V_L} \right)^{n-1} \quad (6.3)$$

ここで R_S は基準電圧 V_S における基準抵抗で式は、次のようになる。

$$R_S = \frac{V_S}{I_S} \quad (6.4)$$

式(6.4)の非線形抵抗 R_L を機構モデルで表すと、図4.0となる。

式(6.3)から警告灯の抵抗 R_L を電圧・電流の測定値から乗数 n を求める。測定結果は図4.1となり、点線が測定値、実線が計算値である。この結果から、最小二乗法で求めた乗数 n は、 $n \approx 0.55$ となり、基準電圧を $V_S = 1.4$ [V]とした基準電流は $I_S = 0.102$ [A]である。

(b) 負特性抵抗素子の機構モデル

サーミスタの外観を図4.2に示し、機構モデルを図4.3に示す。同図のサーミスタは、液が出入りする3個の穴を上下に開けた円筒形金属ケースに収められている

図4-3は、サーミスタの特性式から必要な数学モデルを導き、これを基にモデル化した。サーミスタの非線形抵抗特性は、温度に依存性する次式となる。

$$R_T = R_0 \exp \left(B_T \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \quad (65)$$

式(65)は、 T_0 が基準温度、 B_T がサーミスタ特性を決めるB定数、 R_0 が T_0 における基準抵抗、 T_x が使用温度である。

サーミスタの自己発熱による上昇温度 T_U は、熱放散係数 δ_T と消費電力 W_T から次式となる。

$$T_U = \frac{W_T}{\delta_T} + T_0 \quad (66)$$

図3-9の機能モデルからサーミスタの消費電力 W_T は、次のようになる。

$$\begin{aligned} W_T &= I_B V_T \\ &= I_B^2 R_T \end{aligned} \quad (67)$$

式(65)・式(66)・式(67)によってサーミスタの消費電力 W_T による温度上昇から抵抗値 R_T を求めことできるが、この一連の式は温度上昇後の定常状態の式である。そこで、サーミスタの熱時定数(乾燥状態)から、実用状態に近い液中と空中を移動する時の応答特性をモデル化する。この状態は、サーミスタが濡れた状態から乾燥する状態とその逆の状態があるので、立ち上がりの遅れを考慮した、2次遅れの過渡モデルを適用する。2次遅れの式は、前に述べた温度上昇モデルと同様に0～1の範囲で正規化した、次の離散化式を使用する。

$$\left. \begin{aligned} X_{a(k+1)} &= P_a X_{a(k)} + (1-P_a) \frac{1-G_{ab}}{2} T_{U(k)} \\ X_{b(k+1)} &= P_b X_{b(k)} + (1-P_b) \frac{1+G_{ab}}{2} T_{U(k)} \\ T_{x(k)} &= X_{a(k)} + X_{b(k)} \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

式(68)は、一次遅れの離散化式2個が干渉した2次の応答特性式である。同式の $P_a \cdot P_b$ は0~1の範囲の値を持つ離散系固有値で、 G_{ab} は2個の1次遅れの入力を分配する係数で、式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} P_a &= \exp\{-t_{smp} / \tau_a\} \\ P_b &= \exp\{-t_{smp} / \tau_b\} \\ G_{ab} &= \frac{\tau_a + \tau_b}{\tau_a - \tau_b} \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

式(69)は、 t_{smp} が標本化周期、 τ_a と τ_b が時定数である。

サーミスタが液中から空中に出る時と空中から液注に入る時では、濡れ方に違いから放熱が異なり、当然応答特性も異なる。この点を考慮して式(66)の δ_T と式(69)の τ_a 、 τ_b を液中と空中で切替える。この2状態を切り替えるスイッチ要素を S_i とし、液中を wat 、空中を dry の下付き添字で識別した、 δ_T と τ_a 、 τ_b を次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} \tau_a &= \tau_{a_wat} S_{W_0} + \tau_{a_dry} S_{W_1} \\ \tau_b &= \tau_{b_wat} S_{W_0} + \tau_{b_dry} S_{W_1} \\ \delta_T &= \delta_{T_wat} S_{W_0} + \delta_{T_dry} S_{W_1} \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

式(70)のスイッチ要素は、液中が $S_{w,0}=1$ と $S_{w,1}=0$ 、空中が $S_{w,0}=0$ と $S_{w,1}=1$ とする。

(4) シミュレーション結果

残量警告灯のシミュレーションは、機能・機構モデルの式に表7の特性値を与えて行った。その結果を図44と図45に示す。

〔表 7〕

残量警告灯の特性値

特性名		記号	単位	特性値
警告灯	基準電圧	V_s	[V]	14.0
	基準電流	I_s	[A]	0.102
	非線形係数	n		0.55
サーミスタ	基準温度	T_0	[K]	298.0
	基準抵抗	R_0	[Ω]	500.0
	B 定数	B_T	[K]	4000.0
	熱放散係数 (液中)	$\delta_{T_{wa}}$	[W/deg]	1.1
	熱放散係数 (空中)	$\delta_{T_{dry}}$	[W/deg]	0.001
	時定数 (a)	$\tau_{a_{wat}}$	[sec]	20.0
	時定数 (b)	$\tau_{b_{wat}}$	[sec]	4.0
	時定数 (a)	$\tau_{a_{dry}}$	[sec]	5.0
	時定数 (b)	$\tau_{b_{dry}}$	[sec]	0.8
電池	起電力	E_0	[V]	14.0
	内部抵抗	R_B	[Ω]	0.001

図44は、サーミスタを液中と空中に出し入れした時のステップ応答である。同図は上から順に、 S_q が液中と空中の条件判定、 $V_T \cdot V_L$ がサーミスタと警告灯の端子電圧、 I_B が回路電流、 $T_X \cdot W_T$ がサーミスタ温度と消費電力である。

図45は、図44と同じ内容で表した、液面の揺れによりサーミスタが液を被る周期を2[s ec]とした再現した応答結果である。同図は、周期内における乾きの時間比率を0[%]~50[%]~100[%]で変化させ、50[%]については30[s ec]間継続した。

図46は、本発明の第3の非線形再現装置の原理説明的な一実施形態を示す図である。尚、この図46は、本発明の第3の非線形特性再現装置の原理を解り易く説明するための図であり、本発明の第3の非線形特性再現装置は、この図46およびその図46の説明に限定されるものではない。

図46は、同一物理量の入出力状態量間に状態量を接続・遮断する状態量切替部（スイッチ要素） S_q と、この状態量切替部を断続するための信号を生成する論理判定部で構成されている。状態量切替部は $f = S_q \cdot v$ で表す線形の数学モデルとし、この式の S_q に論理判定部から0又は1の非線形な論理値 S_{NL} を代入する。論理判定部には、判定するための状態量として、次期標本化時期の推定観測量が入力され、次期モデル状態を決定する論理値が生成される。この論理値を状態切替部のスイッチ要素 S_q に代入することによって、論理値が0の時は出力状態量が $f = 0$ となり、1の時は $f = v$ となる。

図46の論理判定部は、 \cup がOR、 \cap がANDの論理演算子である。したがって、論理判定部の論理式は、状態量 v_i と f_i が0以上を1その他は0とし、 S_i を0・1の論理値とすると、 S_i または f_i が1で v_i が1の時に論理値1を生成し、状態量切替部の出力状態量 f と入力状態量 v が結合される。

（事例説明）

8. がた・底突きモデル化例

図47に模式的ながたの構造モデルを示す。同図は、外筒Bの中に± L_0 の範囲を持つ可動体Aが組み込まれた例である。そして、可動体Aには速度 v_1 と力 f_1 によるエネルギーが加わり、同様に外筒Bも v_2 と f_2 が加わっている。尚、図中の y は外筒Bの中心を0とする可動体Aの相対位置である。

図47の構造モデルは、可動体Aが $\pm L_g$ の範囲では可動体Aと外筒Bは互いに独立して動き、これを超えると両者は一体となり剛体として動く。従って、がた（底突き）は、両者を一体にした剛性による接続と開放が基本機能と考えられる。この関係を整理してモデル化すると、図48の機能モデルとなる。

(1) 機能モデル

図48は、 K_g が接触した時の剛性、 C_g が粘性抵抗係数、 v_1 が可動体Aと外筒Bの速度差、 x が内部状態量である。同図（a）は機構モデルから非線形な剛性を代入する方法でモデル化し、（b）はスイッチ要素を組み込み K_g が接続・開放される構造非線形としてモデル化されている。がたはこのように機構モデルと構造非線形のどちらの方法でもモデル化が可能である。しかし、がたの基本機能は、外筒Aと可動体Bの剛性を接続・開放することから、（b）の構造非線形によるモデル化の方が望ましい。なぜなら、（a）の機構モデルで表わした場合は、機能モデルと支配方程式にスイッチ要素が組み込まれないので、構造的に非線形であることを識別することが困難である。

まず、図48（a）の機能モデルは、以下の支配方程式となる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ f_1 \\ f_2 \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_g} & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & -C_g & C_g \\ 0 & 1 & C_g & -C_g \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ x \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (71)$$

次に、図48（b）の機能モデルは、次の支配方程式と結合条件式になる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ f_1 \\ f_2 \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_g S_{WT}} & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & C_g & -C_g \\ 0 & 1 & C_g & -C_g \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ x \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (72)$$

$$\left. \begin{aligned} v_d &= v_{i-} \\ S_{WK} &= S_{wy} \end{aligned} \right\} \quad (73)$$

(2) 機構モデル (間隙モデル)

図48 (a) の中にある機構モデルは、次式で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} y &= \int v_d dt \\ L_m &= y - L_0 \\ \text{if } (|L_m| \geq 0) \text{ then } (K_g = K_{g0}) \text{ else } (K_g = 0) \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

式(74)は、1行目が稼動体Aの相対距離 y 、2行目が外筒Bの壁と可動体Aの距離 L_m 、3行目が接続と開放の剛性値 K_g である。

図48 (b) の機構モデルは、次式で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} y &= \int v_d dt \\ L_m &= y - L_0 \\ \text{if } (|L_m| \geq 0) \text{ then } (S_{wy} = 1) \text{ else } (S_{wy} = 0) \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

式(75)は、1～2行目は式(74)と同じ、3行目は外筒Bと可動体Aの接触を判定する条件判定式である。この条件判定は、接触状態を $S_{wy}=1$ とし、非接触状態を $S_{wy}=0$ とする。そして、この条件判定 S_{wy} によるスイッチ要素 S_{wy} の操作で剛性 K_g を接続・開放する。

(3) シミュレーション結果

一つの事例として、図49で示す液体を封入したシリンダーと小穴を設けたピストンの粘性抵抗係数 C_g による衝撃吸収用ダンパーの底突きについて検討する。この図49は、 M_a がピストン質量・ C_a が粘性抵抗係数・ M_b がシリンダー質量・ C_b が粘性抵抗係数である。また外部とは、ピストンとシリンダーに操作力 f_a と f_b が作用し、速度 v_a と v_b が出力さる。その他については、図49で示す機能モデルと同じであ

る。

図49で示す構造モデルのモデル化は、図48(b)の機能モデルに同図の $M_a \cdot C_a \cdot M_b \cdot C_b$ を付加機能として追加することで実現できる。従って、衝撃吸収用ダンパーは図48(b)の機能モデルに、これらの附加機能を追加した図50の機能モデルとなる。尚、図中の各 x は内部状態量である。

図50の両側に付加機能を追加する結合条件は、それぞれ次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} v_{ao} = v_1 \\ f_1 = f_{ai} \end{array} \right\} \quad (76)$$

$$\left. \begin{array}{l} v_{bo} = v_2 \\ f_2 = f_{bi} \end{array} \right\} \quad (77)$$

式(76)と式(77)にピストン・がたの機能モデル・シリンダーを統合すると、次式となる。

【数 7 8】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v_a \\ v_b \\ f_1 \\ v_i - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_g S_{wy}} & 0 & -(C_g + C_a) & -1 & C_g & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -M_b & C_g & 1 & C_g - C_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_g & -1 & C_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_a \\ x' \\ x'_b \\ x_a \\ x \\ x_b \\ f_a \\ f_b \end{bmatrix} \quad (78)$$

図 5 0 の底突きダンパーの機能・機構モデルを表 8 で示す各特性値でシミュレーションをおこなった、その結果を図 5 1 に示す。

図 5 0 の底突きダンパーの機能・機構モデルを表 8 で示す各特性値でシミュレーションをおこなった、その結果を図 5 1 に示す。

【表 8】

衝撃吸収用ダンパーの特性値

	特性名	記号	単位	特性値
ピストン	質量	M_a	[Kg]	0.2
	粘性抵抗係数	C_a	[N/(m/sec)]	0.5
シリンダー	可動質量	M_b	[Kg]	2.0
	粘性抵抗係数	C_b	[N/(m/sec)]	10.0
がた特性	底突き剛性	K_g	[N/m]	1.0×10^6
	粘性抵抗係数	C_g	[N/(m/sec)]	15.0
	がた幅	L_0	[m]	0.001

図5 1のシミュレーション結果の速度 v_a は、速度 v_b と対比させるために正負を反転して表してある。また、図5 1のシミュレーションは、操作力を与えたピストンの動きに従ってシリンダーが従動する状態を再現したものである。操作としては、ピストンの操作力 f_a に1 [N]を加え、0.15 [sec]後に逆方向の捜査力-1 [N]を加え、0.3 [sec]後に操作力を0にして終了した。この際、シリンダー側の操作力 f_b [N]は与えていない。シミュレーション結果は、同図の上から順に、ピストンに加えた操作力 f_a [N]、ピストン速度 v_a [m/sec]とシリンダー速度 v_b [m/sec]、ピストンとシリンダー間に作用する力 $f_1 \cdot f_2$ [N]、シリンダーにおけるピストンの相対位置 y [m]である。尚、上から2番目の速度は、実線が駆動側のピストン速度 v_a で、点線が従動側のシリンダー速度 v_b を表している。

図5 1において、ピストンとシリンダーの速度 $v_a \cdot v_b$ から、両者は約0.03 [sec]で接触して底突きを繰り返しながら収束して、約0.08 [sec]後に一体となる。接触の瞬間には、衝突の衝撃によって反発力が発生し、両者は接触と離反を繰り返しながら収束することが判る。このことは、両者間に作用する力 f_1 の衝撃荷重と相対位置 y の変動からも判る。次に、操作力 f_a を反転するとピストンは、シリンダーの反対側の壁に接触して同様の結果を示している。また、最後に操作力 f_a を除くとピストンがシリンダーが一体となって停止する。

9. 摩擦クラッチ

クラッチは、2つの系を滑らかに接続・開放するための基本的な機械要素である。その中で摩擦クラッチ機構は、動作中の系を切り替える機械要素として幅広く利用されている。ここでは、このクラッチの基本的な機能について、モデル化を検討する。

クラッチには、常時接続する方式と常時開放する2種類の方式がある。図5 2は、常時開放する方式のクラッチ構造を模式的に表わした例で、クラッチの押し付け力 F_p によって右側の白い角のクラッチ片が左側に押し付けられ、左右の系の間で動力伝達を行う。クラッチには、右側の系から $\omega_1 \cdot T_1$ の回転エネルギーが加わり、同様に右側の系からも $\omega_2 \cdot T_2$ が加わっている。この2つの系を接続したクラッチは、クラッチ剛性 K で左右の系が一体となり、両系には同一エネルギーが受け渡しされ

る。滑り状態ではクラッチの摩擦トルクで左右の系が接続され両者の間には角速度差が生じる。この角速度差と摩擦トルクによって生じる損失は、熱エネルギーとなつて消費される。またクラッチが開放された状態では左右の系は切り離され、互いに独立した系となる。

(1) 基本機能

次に、クラッチの基本機能について検討を行う。クラッチは、接続・滑り・開放の本来の機能と、2つの系が持つ各パラメータの付加機能に分けることができる。そして、この3つの状態に分けた機能は、以下のよう考えることができる。

- ①接続は、2つの系に速度差が無くクラッチが滑らない状態。
- ②滑りは、クラッチの摩擦トルクで2つの系を駆動する状態。
- ③開放は、摩擦トルクが0となり2つの系が切り離された状態。

この3状態から摩擦トルクによる滑りが、クラッチの接続と開放を支配していることが判る。この関係を示すと図5-3となる。

図5-3は、横軸が摩擦トルク T_f 、縦軸が負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ で表したクラッチのトルク伝達特性である。この図で示す T_{f0} は、摩擦によるクラッチの伝達トルクである。この伝達トルク T_{f0} により負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ が小さい領域では、左右の系がクラッチ剛性 K で一体となり、クラッチは接続状態となる。その外の領域では、伝達トルク T_{f0} によって負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ が供給され、クラッチは滑り状態となる。この伝達トルク T_{f0} は、クラッチの押し付け力 F_f で変化し、 $T_{f0}=0$ のとき負荷トルクも $T_1=T_2=0$ となり、クラッチは開放状態となる。従って、図5-3における接続と滑りの関係はクラッチを介して2つの系に加わる負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ と摩擦トルク T_f の大小関係に支配される。例えば、負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ が摩擦トルク T_{f0} 以下のときは接続し、 T_{f0} 以上のときは摩擦トルク T_{f0} で滑りが発生する。この働きからクラッチは、2つの系を一体とするクラッチ剛性 K 、クラッチの滑りを支配する伝達トルク T_{f0} 、この両者の切り替えが基本機能となる。

(2) 機能モデル (クラッチモデル)

クラッチの基本機能を元にモデル化した機能・機構モデルを図5-4に示す。同図は、常時開放する方式のクラッチモデルである。図5-4(a)はクラッチ剛性 K で接続するクラッチモデルを表し、同図(b)はクラッチ剛性 K を粘性抵抗係数 D に

置き換えて、低次元化を行なったクラッチモデルである。両図は、Kが接続時のクラッチ剛性、Dがクラッチ摩擦片の粘性抵抗係数、 T_f が摩擦トルク、 $T_{c_}$ がクラッチの剛性トルク、 S_{wc} が $T_{c_}$ と T_f を切替えるスイッチ要素で構成する機能モデルに、クラッチを操作する機構モデルが組み込まれている。 x は内部状態量を示す。粘性抵抗係数Dに置き換えた図54（b）のクラッチモデルは、接続状態で微少な滑りが発生する。また、粘性抵抗係数Dの一般的な特性は線形であるが、この特性を機構モデルで非線形化して、負の粘性抵抗係数を持たすことでクラッチの異常振動や異音（泣き）の現象を再現することが可能である。

図54（a）の支配方程式は次式となる。尚、機構モデルの接続条件は省略する。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K} & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -S_{wc-1} & -DS_{wc-1} & DS_{wc-1} & -T_f S_{wc-0} \\ 0 & S_{wc-1} & DS_{wc-1} & -DS_{wc-1} & T_f S_{wc-0} \\ 0 & 1 & D & -D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_k \\ x_k \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (79)$$

式（79）において、1行目は状態方程式、2と3行目は入出力方程式、4行目はクラッチトルクの観測方程式である。同様に図54（b）の支配方程式は、式（79）から状態方程式と内部状態量を除いた次式となる。

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -DS_{wc-1} & DS_{wc-1} & -T_f S_{wc-0} \\ DS_{wc-1} & -DS_{wc-1} & T_f S_{wc-0} \\ D & -D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (80)$$

（3）機構モデル（結合判定モデル）

図54の（a）・（b）は、共に同じ機構モデルとなり、クラッチの剛性トルク $T_{c_}$ を推定観測量とする条件判定 S_{wc} と伝達トルク T_{f0} を代入量として出力している。機構モデルの内容は、以下のようになる。

伝達トルク T_{f0} は、次の摩擦トルクの式から求めることができる。

$$T_{f0} = \mu_f A_f R_f F_f \frac{T_c}{|T_{c-}|} \quad (8.1)$$

ここで、 μ_f は摩擦材の動摩擦係数・ A_f は摩擦面の摺動面積、 R_f は摩擦面の平均半径、 F_f はクラッチ押付荷重で、 T_{f0} の正負は推定観測量 T_{c-} と一致させる。

この例では、クラッチの摩擦トルク T_f を動摩擦トルクで表したモデルである。従って、クラッチの挙動を詳細に検討する際は、静摩擦・動摩擦および摩擦熱による摩擦トルク変動などを考慮する必要がある。

次に、クラッチの滑りと接続状態を判定する条件判定は、次のようになる。

$$\text{if } (|T_{f0}| \geq |T_c|) \text{ then } (S_{wc} = 1) \text{ else } (S_{wc} = 0) \quad (8.2)$$

式(8.2)において、伝達トルク T_{f0} が剛性トルク T_c 以上の時は $S_{wc} = 1$ にして接続状態とし、逆は $S_{wc} = 0$ の滑り状態とする。また、この滑り状態では、流動蓄積要素の内部状態量 x_k を次式で初期化する。

$$\text{if } (S_{wc} = 0) \text{ then } (x_k = 0) \quad (8.3)$$

また、常時接続方式のクラッチモデルでは、条件判定式(8.2)の比較演算子の判定を逆にした式 $|T_{f0}| \leq |T_{c-}|$ となり、図5.4のスイッチ要素 S_{wc0} と S_{wc1} を入れ替わる。

(4) シミュレーション結果

図5.2で示す構造モデルの左右に慣性モーメント $J_D \cdot J_L$ と粘性抵抗係数 $C_D \cdot C_L$ の駆動系と負荷系を付加し、これに入力トルク $T_D \cdot T_L$ と出力角速度 $\omega_D \cdot \omega_L$ の状態量で外部と接続する。その機能モデルを図5.5に示す。

図5.5の機能モデルには、図5.4(a)のクラッチ剛性 K を考慮したクラッチモデルを使用する。 x は内部状態量である。図5.5の支配方程式を次のようになる。

[数 8 4]

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_D \\ \omega_L \\ T_2 \\ T_{c-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_D & 0 & 0 & -(C_D + DS_{wc-1}) & -S_{wc-1} & DS_{wc-1} & 1 & 0 & -T_f S_{wc-0} \\ 0 & 0 & \frac{1}{K} & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -J_L & S_{wc-1} & -(C_L + DS_{wc-1}) & 0 & -1 & T_f S_{wc-0} \\ \omega_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ T_2 & 0 & 0 & 0 & S_{wc-1} & -DS_{wc-1} & 0 & 0 & T_f S_{wc-0} \\ T_{c-} & 0 & 0 & D & 1 & -D & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ x_k \\ x_L \\ x_D \\ x_k \\ x_L \\ T_D \\ T_L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (84)$$

図55の機能モデルに表9の特性値を使用したシミュレーション結果を、図56に示す。尚、同図で示す角速度 ω_0 は、速度 ω_L と対比するために正負が反転してある。

【表9】

クラッチの特性値

特性名		記号	単位	特性値
駆動側	慣性モーメント	J_D	[Kg m^2]	0.0001
	粘性抵抗係数	C_D	[Nmsec/rad]	0.00025
負荷側	慣性モーメント	J_L	[Kg m^2]	0.0003
	粘性抵抗係数	C_D	[Nmsec/rad]	0.00035
クラッチ	クラッチ剛性	K	[rad/Nm]	0.1
	粘性抵抗係数	D	[Nmsec/rad]	0.015
	クラッチ摩擦トルク	T_f	[Nm]	0.1

図56のシミュレーションは、駆動系に0.1[N]のトルク T_0 を加えると同時にクラッチ摩擦トルク T_f を0.25[Nm/sec]で上昇してクラッチを接続し、接続後は1.5[sec]後に、負荷トルク $T_L=0.145$ [Nm]を0.5[sec]の期間ステップ状に与えてクラッチを滑らせ、最期の3.5[sec]でクラッチを開放した結果である。図56は上から順に、駆動系のトルク T_0 [Nm]、クラッチの摩擦トルク T_f [Nm]（側負荷）、負荷系のトルク T_L [Nm]、駆動角速度 ω_0 側と負荷角速度 ω_L 、クラッチのトルク T_c を表している。

図56において、起動に際しては、駆動系の角速度 ω_0 側が上昇し摩擦トルク T_f を増加することによって負荷系の負角速度 ω_L も上昇する。しかし、途中から駆動系は負荷系に引き続き込まれて角速度 ω_0 が低下し、約0.5[sec]の点で両者が一致して結合状態（エンゲージ）となり両者は一体となって回転が上昇する。この結合までは、摩擦トルク T_f によって負荷系が駆動され、クラッチの伝達トルク T_c と摩擦トルク T_f は同じとなる。エンゲージ後はクラッチ伝達トルク T_c がクラッチ剛性によるトルクに置き換わり、急激に低下している。

次に外部から負荷系にトルク T_L を加えるとクラッチに加わるトルクは、摩擦トルク T_f 以上になってクラッチが滑り初め ω_0 と ω_L 間に角速度差が発生する。この時のクラッチ負荷トルク T_c は再び摩擦トルク T_f に置き換わる。この負荷トルク T_L を除くと $\omega_0 \cdot \omega_L$ 間の角速度差が無くなり、クラッチ結合状態となって再び回転が上昇する。最後に摩擦トルク T_f を0にしてクラッチを切ると、駆動系と負荷系は別々に減速して停止する。

10. 摩擦ブレーキ

ブレーキは、エネルギーを強制的に吸収する速度調整、慣性モーメントなどの蓄積エネルギーを吸収するため基本的な機械要素の一つである。ブレーキにも多くの種類があるが、ここでは摩擦力を利用したブレーキについて検討する。

摩擦ブレーキは、クラッチと同様に摩擦力で制動トルクを制御する。クラッチモデルをブレーキに応用するには、回転していた駆動系と負荷系の片側を固定してクラッチの滑りで消費するエネルギーを制動エネルギーとして駆動系に与えることで実現できる。負荷側の固定には、2通りの方法がある。一つは負荷側に剛性を接続するか、または図55の慣性モーメント M_L を大きくする方法で、制動力が取り付け

部に与える影響まで検討する時に適用する。今一つは図5.5の負荷側の慣性モーメント M_L と粘性抵抗係数 C_L を除いて角速度 ω_L を零にする方法で、ブレーキの制動機能を検討する時に適用する。ここでは、後者のブレーキモデルについて検討する。以下、この点を考慮したブレーキのモデル化を行う。ブレーキ構造を模式的に表した構造モデルを、図5.7に示す。同図は、軸の駆動側に角速度 ω_D ・駆動トルク T_D を加え、負荷側に角速度 ω_D ・トルク T_D を与える。この軸にはブレーキの摩擦トルク T_f が制動トルクとして作用する構造になっている。

(1) 機能モデル（ブレーキモデル）

ブレーキはクラッチと異なり動力を伝達する機能を持たないので、動力を伝達する駆動軸に制動エネルギーを負荷として加えるモデルとなる。従って、ブレーキモデルは、駆動軸のモデルにクラッチモデルを並列に配した機能モデルとなる。これを機能・機構モデルで表すと図5.8となる。

図5.8は駆動軸の駆動側に慣性モーメント J_D と粘性抵抗係数 C_D が追加され、負荷側に慣性モーメント J_L と粘性抵抗係数 C_L が追加されている。同図において、 ω_1 と T_1 はブレーキの角速度と制動トルクである。そして制動エネルギーを生成する機能は、図5.4(a)のクラッチモデルから右側の入出力状態量 ω_2 と T_2 が除かれている。また、この機構モデルは、各特性の大半が図5.4(a)と同一であるが、その中の μ_f がブレーキパッドの動摩擦係数・ A_f が摺動面積・ R_f が摺動半径・ F_f がブレーキ操作荷重に置き換わる。

図5.8で示す駆動側と負荷側の慣性モーメント J_D ・ J_L は、内部状態 x_d' と x_L' 同じなので、この微分量を加算結合して慣性モーメントを $J_D + J_L$ にすることができる。慣性モーメント J_D ・ J_L を統合したブレーキモデルの支配方程式は、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_D \\ T_1 \\ T_L \\ T_{c-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_D + J_L & 0 & -(C_D + C_L + DS_{WC-1}) & 1 & -T_f S_{WC-0} \\ 0 & 1 - \frac{1}{K} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & DS_{WC-1} & S_{WC-1} & T_f S_{WC-0} \\ J_D & 0 & D_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ x_k \\ x_D \\ x_k \\ T_D \\ 1 \end{bmatrix}$$

(85)

式（８５）は、１～２行目が状態方程式、３行目が入出力方程式、４～５行目が観測方程式、６行目が推定観測方程式である。機構モデルについては、クラッチモデルの式（８１）～式（８３）と同じである。

（２）シミュレーション結果

図５８で示す機能・機構モデルに、表１０の特性値を与えて行ったシミュレーション結果を図５９に示す。

図 58 機能・機構モデルのブロック図

【表10】

ブレーキの特性値

	特性名	記号	単位	特性値
駆動側	慣性モーメント	J_D	[K gm ²]	0.0001
	粘性抵抗係数	C_D	[Nmsec/rad]	0.01
負荷側	慣性モーメント	J_L	[K gm ²]	0.001
	粘性抵抗係数	C_L	[Nmsec/rad]	0.2
ブレーキ	クラッチ剛性	K	[rad/Nm]	2.5×10^4
	粘性抵抗係数	D	[Nmsec/rad]	0.2
ブレーキ (機構)	動摩擦係数	μ_f	[Nm]	0.1
	摺動面積	A_f	[m ²]	1.0×10^{-3}
	摺動半径	R_f	[m]	150.0×10^{-3}

図59は、上から順に駆動軸の角速度 ω_0 [rad/sec]・制御トルク T_f [Nm]・推定観測量 T_{est} [Nm]・駆動トルク T_0 [Nm]・条件判定 S_{sc} である。

シミュレーションの実行は、起動と同時に駆動トルク $T_0=1$ [Nm]を与え、0.02 [sec]でブレーキ操作荷重 $F_f=8 \times 10^4$ [N]加えて制動を掛け、0.06 [sec]で $T_0=-1$ [Nm]の逆駆動トルクに切替えた。そして、0.08 [sec]でブレーキ操作荷重を $F_f=2 \times 10^4$ [N/sec]の速度でゆっくり降下させて、0.1 [sec]でブレーキを切った。

図59において、0.02 [sec]でブレーキを掛けると $T_f < T_{\text{est}}$ の状態になるので摩擦トルク T_f によって制動トルクが作用して角速度 ω_0 が減速し、 $T_f > T_{\text{est}}$ になった状態で強制的にブレーキによって停止させられる。更に0.06 [sec]で駆動トルクを逆転させるとその反力で瞬間的にブレーキの滑りが角速度 ω_0 に現われ、条件判定 S_{sc} が瞬断する。また、0.08 [sec]から徐々にブレーキをゆるめると $T_f < T_{\text{est}}$ になった時点からブレーキが滑り始め、角速度 ω_0 も増加(逆方向)し始める。そしてブレーキを切ると加速する。

1.1. 自動復帰機構

自動復帰機構は、図60に示すように、レバーの一部にリターンズプリングのバネのこわさ K_R で停止位置に帰す復帰トルクを与える機構となっている。また、このレバーは、ゴム製スットバーの剛性 K_C ・粘性抵抗 D_C で動作範囲が規制される。この機能・機構モデルは、図61のようになる。

図61は、レバーの角速度 ω_s とトルク T_s の対が入出力状態量として外部と接続されている。その内部特性は、リターンズプリングをこわさ K_R で表し、ゴム製スットバーを剛性 K_C と非線形粘性係数 D_C で表してある。これに作用するレバーの回転中心と荷重点までの距離は、図60で示す寸法 L_R と L_C が図61の係数となっている。また、図中の x は内部状態量を示す。

まず、図61の自動復帰機構の支配方程式は、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ T_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_R L_R^2 + K_C L_C^2 S_{WC}} & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -D_C L_C^2 S_{WC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_R \\ x_R \\ \omega_S \end{bmatrix}$$

(8 6)

式(86)は、図61の K_R と K_C のバネが並列接続なので、これを一個のバネのこわさに統合して低次元化を行なった一行一列の状態方程式となっている。

次に、図61の機能を成立させる機構モデルについて数学モデルを求める。

推定回転角 $\theta_{R_}$ は、図60で示すレバー作動範囲 θ_{max} [rad]で動きが規制される。この条件判定 S_{WC} は、次のようになる。

図60
図61
図62
図63
図64
図65
図66
図67
図68
図69
図70
図71
図72
図73
図74
図75
図76
図77
図78
図79
図80
図81
図82
図83
図84
図85
図86
図87
図88
図89
図90
図91
図92
図93
図94
図95
図96
図97
図98
図99
図100
図101
図102
図103
図104
図105
図106
図107
図108
図109
図110
図111
図112
図113
図114
図115
図116
図117
図118
図119
図120
図121
図122
図123
図124
図125
図126
図127
図128
図129
図130
図131
図132
図133
図134
図135
図136
図137
図138
図139
図140
図141
図142
図143
図144
図145
図146
図147
図148
図149
図150
図151
図152
図153
図154
図155
図156
図157
図158
図159
図160
図161
図162
図163
図164
図165
図166
図167
図168
図169
図170
図171
図172
図173
図174
図175
図176
図177
図178
図179
図180
図181
図182
図183
図184
図185
図186
図187
図188
図189
図190
図191
図192
図193
図194
図195
図196
図197
図198
図199
図200
図201
図202
図203
図204
図205
図206
図207
図208
図209
図210
図211
図212
図213
図214
図215
図216
図217
図218
図219
図220
図221
図222
図223
図224
図225
図226
図227
図228
図229
図230
図231
図232
図233
図234
図235
図236
図237
図238
図239
図240
図241
図242
図243
図244
図245
図246
図247
図248
図249
図250
図251
図252
図253
図254
図255
図256
図257
図258
図259
図260
図261
図262
図263
図264
図265
図266
図267
図268
図269
図270
図271
図272
図273
図274
図275
図276
図277
図278
図279
図280
図281
図282
図283
図284
図285
図286
図287
図288
図289
図290
図291
図292
図293
図294
図295
図296
図297
図298
図299
図300
図301
図302
図303
図304
図305
図306
図307
図308
図309
図310
図311
図312
図313
図314
図315
図316
図317
図318
図319
図320
図321
図322
図323
図324
図325
図326
図327
図328
図329
図330
図331
図332
図333
図334
図335
図336
図337
図338
図339
図340
図341
図342
図343
図344
図345
図346
図347
図348
図349
図350
図351
図352
図353
図354
図355
図356
図357
図358
図359
図360
図361
図362
図363
図364
図365
図366
図367
図368
図369
図370
図371
図372
図373
図374
図375
図376
図377
図378
図379
図380
図381
図382
図383
図384
図385
図386
図387
図388
図389
図390
図391
図392
図393
図394
図395
図396
図397
図398
図399
図400
図401
図402
図403
図404
図405
図406
図407
図408
図409
図410
図411
図412
図413
図414
図415
図416
図417
図418
図419
図420
図421
図422
図423
図424
図425
図426
図427
図428
図429
図430
図431
図432
図433
図434
図435
図436
図437
図438
図439
図440
図441
図442
図443
図444
図445
図446
図447
図448
図449
図450
図451
図452
図453
図454
図455
図456
図457
図458
図459
図460
図461
図462
図463
図464
図465
図466
図467
図468
図469
図470
図471
図472
図473
図474
図475
図476
図477
図478
図479
図480
図481
図482
図483
図484
図485
図486
図487
図488
図489
図490
図491
図492
図493
図494
図495
図496
図497
図498
図499
図500
図501
図502
図503
図504
図505
図506
図507
図508
図509
図510
図511
図512
図513
図514
図515
図516
図517
図518
図519
図520
図521
図522
図523
図524
図525
図526
図527
図528
図529
図530
図531
図532
図533
図534
図535
図536
図537
図538
図539
図540
図541
図542
図543
図544
図545
図546
図547
図548
図549
図550
図551
図552
図553
図554
図555
図556
図557
図558
図559
図560
図561
図562
図563
図564
図565
図566
図567
図568
図569
図570
図571
図572
図573
図574
図575
図576
図577
図578
図579
図580
図581
図582
図583
図584
図585
図586
図587
図588
図589
図590
図591
図592
図593
図594
図595
図596
図597
図598
図599
図600
図601
図602
図603
図604
図605
図606
図607
図608
図609
図610
図611
図612
図613
図614
図615
図616
図617
図618
図619
図620
図621
図622
図623
図624
図625
図626
図627
図628
図629
図630
図631
図632
図633
図634
図635
図636
図637
図638
図639
図640
図641
図642
図643
図644
図645
図646
図647
図648
図649
図650
図651
図652
図653
図654
図655
図656
図657
図658
図659
図660
図661
図662
図663
図664
図665
図666
図667
図668
図669
図670
図671
図672
図673
図674
図675
図676
図677
図678
図679
図680
図681
図682
図683
図684
図685
図686
図687
図688
図689
図690
図691
図692
図693
図694
図695
図696
図697
図698
図699
図700
図701
図702
図703
図704
図705
図706
図707
図708
図709
図710
図711
図712
図713
図714
図715
図716
図717
図718
図719
図720
図721
図722
図723
図724
図725
図726
図727
図728
図729
図730
図731
図732
図733
図734
図735
図736
図737
図738
図739
図740
図741
図742
図743
図744
図745
図746
図747
図748
図749
図750
図751
図752
図753
図754
図755
図756
図757
図758
図759
図760
図761
図762
図763
図764
図765
図766
図767
図768
図769
図770
図771
図772
図773
図774
図775
図776
図777
図778
図779
図780
図781
図782
図783
図784
図785
図786
図787
図788
図789
図790
図791
図792
図793
図794
図795
図796
図797
図798
図799
図800
図801
図802
図803
図804
図805
図806
図807
図808
図809
図810
図811
図812
図813
図814
図815
図816
図817
図818
図819
図820
図821
図822
図823
図824
図825
図826
図827
図828
図829
図830
図831
図832
図833
図834
図835
図836
図837
図838
図839
図840
図841
図842
図843
図844
図845
図846
図847
図848
図849
図850
図851
図852
図853
図854
図855
図856
図857
図858
図859
図860
図861
図862
図863
図864
図865
図866
図867
図868
図869
図870
図871
図872
図873
図874
図875
図876
図877
図878
図879
図880
図881
図882
図883
図884
図885
図886
図887
図888
図889
図890
図891
図892
図893
図894
図895
図896
図897
図898
図899
図900
図901
図902
図903
図904
図905
図906
図907
図908
図909
図910
図911
図912
図913
図914
図915
図916
図917
図918
図919
図920
図921
図922
図923
図924
図925
図926
図927
図928
図929
図930
図931
図932
図933
図934
図935
図936
図937
図938
図939
図940
図941
図942
図943
図944
図945
図946
図947
図948
図949
図950
図951
図952
図953
図954
図955
図956
図957
図958
図959
図960
図961
図962
図963
図964
図965
図966
図967
図968
図969
図970
図971
図972
図973
図974
図975
図976
図977
図978
図979
図980
図981
図982
図983
図984
図985
図986
図987
図988
図989
図990
図991
図992
図993
図994
図995
図996
図997
図998
図999
図1000

if $(\theta_{R_-} \geq \theta_{\max})$ then $S_{WC} = 1$ else $S_{WC} = 0$

(8 7)

式(87)の条件判定は、 $S_{WC} = 1$ の条件成立でレバーが強制停止し、 $S_{WC} = 0$ の条件不成立で自由に回転する。

最期に、レバーを強制停止させるゴム製ストッパは、試行的な試験から圧縮と伸び方向で作用力が異なることが判明した。そこで、これを減衰抵抗係数 D_C の非線形形で表すことにした。この非線形性は、レバーによる圧縮方向はゴムの荷重が作用するが、引っ張り方向は伸びの遅れからあまり作用しないことが原因と推定できる。実際には、ゴムの圧縮剛性 K_C も変形量に応じて非線形となるが、この剛性は線形と見なしてモデル化した。減衰抵抗係数 D_C の非線形の考え方を図示すると図62となる。

図62は、レバーが接触した状態の圧縮方向の減衰抵抗係数を D_{C_H} 、伸び方向の減衰抵抗係数を D_{C_L} とし、たわみ量では減衰抵抗係数が変化しないことを想定した図である。この減衰抵抗係数の方向性は、レバーの正回転と逆回転を圧縮と伸び方向に関連付けて判定し、減衰抵抗係数 $D_{C_H} \cdot D_{C_L}$ を切り替えることでモデル化できる。この条件判定 S_{WCD} は、次式となる。

if $(\omega_R \theta_R \leq 0)$ then $S_{WCD} = 1$ else $S_{WCD} = 0$

式(88)において、 ω_{R-} は正転と逆転の回転方向を判断し、 θ_{R-} との積が正のときは圧縮、負のとき伸びと判断する。減衰抵抗係数 $D_{C-H} \cdot D_{C-L}$ の切りかえは、同時に1と0の状態を持たない S_{WCD_0} と S_{WCD_1} の切り替えスイッチ要素で行ない、判定が不成立のときは $S_{WCD_0} = 1$ で圧縮側、成立のとき $S_{WCD_1} = 1$ で伸び側とする。

1.2. 空振り機構

空振り機構は、外部から行う手動操作とアクチュエータによる自動操作の干渉を防止する機構である。この空振り機構の動作説明図を、図6.3に示す。

図6.3は、モータで駆動されるレバーがスライダに設けられた幅 L_H の穴に貫通して結合する。同図は、 X_L が図6.0で示すレバー停止位置を基準にしたレバーの移動量、 X_S がスライダの推定移動量、 Y_F が両者間の相対距離である。ここで、 $X_L \cdot X_S$ は推定移動量である。尚、図6.3の動作については、後で述べる。図6.3の機能モデルは、図6.4のようになる。

図6.4は、 K_F がスライダ押し側の圧縮剛性、 M_S がスライダ質量、 D_S が粘性抵抗係数、 L_F が図6.0で示すレバーとスライダの接触位置でレバー回転角による L_F の変化は無視する。同図は、角速度 ω_F とトルク T_F が減速機構と結合し、出力速度 v_S と負荷荷重 F_S が外部のドアラッチ機構と結合する。 x_S は内部状態量である。

まず、図6.4の支配方程式は、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \nu_S \\ T_F \\ \nu_{S-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_S & 0 & D_S & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_P S_{HF}} & -1 & 0 & 0 & L_F \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_F & 0 & 0 \\ S_{amp-t} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_S \\ x'_F \\ x_S \\ x_F \\ F_S \\ \omega_F \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \nu_{SS-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ S_{amp-t}^2 & 0 & S_{amp-t} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_S \\ x'_{SS} \\ x_S \\ x_{SS} \end{bmatrix}$$

(89)

式(89)の上側は、支配方程式で、1～2行目が状態方程式、3～4行目が出力方程式、3行目が推定観測方程式である。同式下側は、質量 M_s の推定蓄積位置量の式で、1行目が内部蓄積観測量 x_{ss} 、2行目がスライダの推定移動量 V_{ss} である。尚、 S_{amp_t} は、標本化周期である。

図64の上側にある機能モデルの数学モデルを導くと以下ようになる。

まず、レバー位置の推定観測量 $V_{FF_}$ は、減速機能の回転角から、次式で導ける。

$$v_{FF_} = L_F \theta_{F_} \quad (90)$$

次に、スライダー移動量 X_s は、質量 M_s の位差系に移動距離 V_{ss} が含まれているので、これを $X_s = V_{ss}$ とする。また、レバー移動量 X_L は式(90)となる。この移動距離 V_{ss} と式(90)からレバーとスライダの相対位置は、次式となる。

$$Y_F = X_S - X_L \quad (91)$$

空振り機構の図63は、スライダーがアンロック側の状態で、レバーをロック側に押す時の状態を表している。同図は、上の図が押し始めた時、中の図が穴の幅 L_H の中心にレバー停止位置がある時、下の図がレバーをロック側に押し切った時の状態を表している。この図から、式(91)の絶対値 $|Y_F|$ が L_H の範囲内にある時、レバーは空振りしてスライダーが動かない。この空振りの条件判定 S_{WF} は、次式となる。

$$if \left(|Y_F| \geq \frac{L_H}{2} \right) then S_{WF} = 1 \text{ else } S_{WF} = 0 \quad (92)$$

最期に、式(92)からスライダーは、 $S_{WF} = 1$ の条件成立でレバーがスライダを押し、 $S_{WF} = 0$ の条件不成立で引き側になってレバーが空振りする。この時のスライダーの移動量 X_s は、スライダーの推定速度 v_{ss} 相対位置 Y_F から押しと空振りの方向を判断する。この条件判定 S_{WF} は、次式となる。

$$\text{if } (v_s - Y_F > 0) \text{ then } S_{WP} = 1 \text{ else } S_{WP} = 0$$

(93)

図65は本発明の第4の非線形特性再現装置の一実施形態のブロック線図を示し、図66は図65に示す非線形特性再現装置の判定状態が図示してある。両図の各変数は、 $(k-1)$ が前の標準化時期、 (k) が現在の標準化時期、 $(k+1)$ が次期標準化時期、以下 $+n$ で現在から将来の n 次期標準化時期を表し、この k を添え字とする状態量 v は、各時期の観測量を表す。また、図中の Δv は現在と次期標準化時期間の推定観測量の変動幅、 V_s は現在の観測量 $v_{(k)}$ と判定値 V_{th} との偏差、 t_{std} は標準化周期である。図65の安定状態判定部は、偏差 V_s が変動幅 Δv より小さい時は判定値を1とし、その逆は0とする。

従来は、指定された安定幅（不感帯）の範囲内に観測量があることで判定するため、標準化周期の変更や変動の激しい観測量などによって安定判断が不安定となる。ここで提案する安定幅（不感帯）を設けない判定法では、標準化周期や状態量の変動による不安定性が防止できる。

また、図67に示すように、上昇用の判定値 V_{th1} と下降用の判定値 V_{th2} を設けることで、状態量の上昇・下降に対しヒステリシスを持たし、より安定な判定も可能である。

図68は、本発明の第5の非線形再現装置の原理説明的な一実施形態を示す図である。尚、この図68は、本発明の第5の非線形特性再現装置の原理を解り易く説明するための図であり、本発明の第5の非線形特性再現装置は、この図68およびその図68の説明に限定されるものではない。

図68は、状態量 $S_2 \cdot S_3$ で生成した定常状態の変動値が0から1の応答範囲を持つ正規化応答部に入力され、正規化応答部の非線形な応答特性によって、定常状態の変動値が時刻層で変化する非線形な応答値として再現される。その再現結果は、特性生成部に入力され状態量変換部の特性 R の変化に変換して代入され、緩慢な応答特性を全系の線形モデルの中で再現（反映）する。

この時刻層応答を再現する装置によって、線形モデル内の複雑な過渡特性を支配

する固有値から、緩慢な挙動をするエネルギー損失による温度上昇の影響や外気温度・気圧などの環境変化に対する影響を支配する固有値を、全系の線形モデルから除外して独立させることができる。ここで除外できる緩慢な過渡応答範囲は、線形モデル内の電気系や機械系の固有値を刺激しない範囲に限られる。

(事例説明)

1.3. 温度上昇のモデル化例

ここでは、比較的ゆっくりした過渡的な変化を非線形として再現するモデル化を試みる。

(1) 正規化1次応答モデル

時間経過により変化する特性の多くは、1次又は2次の応答特性として表すことが多い。そこで、1次と2次の応答遅れを0～1の範囲に正規化した、無単位量の係数と考えた離散化式を用いる。1次応答の一般式は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} z_{1(k+1)} &= p_1 z_{1(k)} + q_1 u_{1(k)} \\ y_{(k)} &= c_1 z_{1(k)} + d_1 u_{1(k)} \end{aligned} \right\} \quad (9.4)$$

$$P_1 = \exp\left(-\frac{t_{smp}}{\tau_1}\right) \quad (9.5)$$

式(9.4)の P_1 は離散化した1次遅れの固有値で、0～1の範囲で収束し、1以上で発散する。また、 τ_1 は系の時定数、 t_{smp} は離散化の標準化周期、 k の添えは標準化時期を示す。

式(9.4)において、 $z_{1(k+1)}$ と $z_{1(k)}$ は内部状態量、 $u_{1(k)}$ と $y_{1(k)}$ は入出力状態量、 q_1 は入力状態量の係数、 c_1 は出力状態量の係数である。同式の定常状態は、 $z_{1(k+1)} = z_{1(k)} = u_{1(k)}$ となり、入出力状態量間には差が発生しない。従って、式(9.4)上側の状態方程式は、入力状態量の係数 q_1 を次式にすることで正規化できる。

$$q_1 = (1 - P_1) \quad (9.6)$$

式(9.4)の q_1 に式(9.6)を代入し、出力方程式の各係数を $c_1 = 1 \cdot d_1 = 0$ にして出力方程式を省略した、次の標準化周期の一次応答(正規化)は、次のようになる。

$$z_{1(k+1)} = p_1 z_{1(k)} + (1 - p_1) u_1 \quad (9.7)$$

(2) 正規化2次応答モデル

同様に2次応答も2個の1次応答の干渉として整理すると、次式のようになる。
尚、途中の整理過程は省略し結果のみ示す。

$$\left. \begin{aligned} z_{a(k+1)} &= p_a z_{a(k)} + (1 - p_a)(1 - g_{ab}) u_{1(k)} \\ z_{b(k+1)} &= p_b z_{b(k)} + (1 - p_b)(1 + g_{ab}) u_{1(k)} \\ y_{2(k)} &= (z_{a(k)} + z_{b(k)})/2 \end{aligned} \right\} \quad (9.8)$$

ここで、 p_a と p_b は式(9.5)に対応した固有値、 g_{ab} は2個の1次応答間の干渉度合いを表す係数で、以下の式で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} p_a &= \exp\{-t_{smp} / \tau_a\} \\ p_b &= \exp\{-t_{smp} / \tau_b\} \\ g_{ab} &= (\tau_a + \tau_b) / (\tau_a - \tau_b) \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

式(9.9)は、 τ_a と τ_b が時定数、 t_{smp} が標準化周期である。

(3) 温度上昇モデル

例として、モータの巻線抵抗の温度依存性についてモデル化する。モータなどに電力を加えれば、巻線抵抗の消費電力 P_v による自己加熱が主因で、温度が上昇する。この温度上昇 T_v は、モータの熱放散係数を δ_v とすると次式で表すことができる。

$$T_U = \frac{1}{\delta_M} P_M \quad (100)$$

式(100)から温度上昇 T_U は、巻線抵抗の消費電力 P_M によって決まり、温度が上昇して電流が減少すると消費電力の低下を招く。その結果、機械的な出力が減少する。モータ電流 I_M ・巻線抵抗 R_M とすると、その消費電力 P_M は次式で表すことができる。

$$P_M = R_M I_M^2 \quad (101)$$

次に、式(100)で発生した温度が定常になるまでの過程は、1次遅れの応答になることが知られている。そこで、式(100)の温度上昇 T_U を目標値とする温度上昇の応答は、式(97)と式(100)から次式で表すことができる。尚、式中の τ_M は熱時定数である。

$$\left. \begin{aligned} T_{x(k+1)} &= P_M T_{x(k)} + (1 - P_M) T_U \\ P_M &= \exp \left\{ -\frac{t_{smp}}{\tau_M} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (102)$$

次に、温度係数 α_W ・基準温度 T_{MS} ・基準抵抗 R_{MS} の特性を持つ巻線の温度 T_x における巻線抵抗 R_M は、次式となる。尚、 T_x は、式(102)で表す推定温度 $T_{x(k+1)}$ である。

$$R_M = R_{MS} \left\{ 1 + \alpha_W (T_{x(k+1)} - T_{MS}) \right\} \quad (103)$$

式(103)は、次の標準化時期の巻線抵抗値を与える式である。尚、雰囲気温度を考慮する時は、その温度を式(103)の温度項に追加する。

(4) 機能モデル

以上の関係を整理してモデル化した機構モデルを組み込んだ機能モデルは、図 6 9 となる。

図 6 9 の機能モデルは、供給要素と流動損失特性の基本機能要素が組み合わせてある。また、機構モデルは、モータの巻線抵抗の消費電力 P_w を機構モデルに与え、機構モデルから温度上昇による巻線抵抗 R_w の更新値を機能モデルに与えている。また、同図の巻線抵抗 R_w の出力位差量には、温度上昇 T_r が温度エネルギーとして蓄積されている。

図 6 9 の機能モデルは、次の支配方程式となる。

$$\begin{bmatrix} I_{MO} \\ V_{MO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_B} & \frac{E_0}{R_B} \\ 1 & E_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Me} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (104)$$

(5) シミュレーション結果

図 6 9 の機能モデルについて表 1 1 の特性値でシミュレーションを行なった結果は、図 7 0 になる。

シミュレーションは、0 [sec] で 12 [V] の電圧を加えて 1500 [sec] で切った時の結果である。この時の電流は、モータの回転が固定されたロック状態を想定して入力電圧 V_w を 0 [V] にした。図 7 0 において、電源 ON 後の温度上昇によって目標値 T_0 が低下するのは、温度上昇によって巻線の抵抗値が増加し、消費電力が低下するためである。そして、時間の経過と共に T_0 と T_r が一致して加熱と放熱がバランスした定常状態になっている。

【表 1 1】

巻線温度上昇の特性表

特性名	記号	単位	特性値
基準温度の巻線抵抗	R_{MS}	[Ω]	2.0
巻線抵抗の基準温度	T_{MS}	[$^{\circ}\text{C}$]	25.0
巻線の温度係数	α_w	[sec]	4.3×10^{-3}
モータ巻線の熱時定数	τ_M	[W/deg]	200.2
モータ巻線の熱放散係数	Ω_M		1.8
電源電圧	E_0	[V]	12.0
電源の内部抵抗	R_B	[Ω]	0.001

1 4. 正特性サーミスタ

(1) 過負荷保護機能の概要

モータは、機械系の出力に接続される機器によって過負荷と強制停止が起こる。このときモータの巻線抵抗には、起動電流に近い過大電流が流れ、これが長時間続くとモータは加熱し焼損する。この過負荷については、モータのトルクと電流がモータ定数 M_M に比例することから、この電流を検出して抑制する機能があれば焼損が防止できる。その方法には、過電流で溶断する簡単なフューズから電子的に遮断する複雑な方法まで色々あるが、ここでは、自動車用小型モータに良く使われる正特性抵抗素子 1 個でモータの過電流を検出して焼損を防止する方法について検討する。尚、ここでは、この正特性抵抗素子を正特性サーミスタと呼ぶことにし、その外觀形状を図 7 1 に示す。

正特性サーミスタは、温度が低いとき抵抗値が小さく、高いときに大きくなる非線形特性を持っている。この特性から、モータ電流が許容範囲内のときは正特性サーミスタの抵抗値が小さく、過負荷では過大電流による自己加熱で抵抗値が増加して電流が抑制される。この働きは、温度依存性を持つ正特性サーミスタの非線形抵抗特性を利用して、過電流の検出と同時に遮断する無接点式スイッチとなっている。

(2) 過負荷保護の機能モデル

モータに正特性サーミスタを直列に接続して、直接モータ電流 I_M (I_T) を流す過電流保護の機能モデルは、図 7 2 となる。

図 7 2 は、抵抗 R_p が正特性サーミスタの非線形抵抗、 t_p が静特性サーミスタの温度、 t_f が周囲温度である。同図で示す過負荷保護特性の機構モデルは、正特性サーミスタが過電流を検出して抑制する非線形抵抗値を生成し、これを R_p に代入する。また、この機能モデルは、 V_T と I_T がモータと接続し、 V_p と I_p が電源側の操作スイッチと接続する。

図 7 2 の過負荷保護の機能モデルは、次の支配方程式となる。

$$\begin{bmatrix} V_p \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_p & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ V_T \end{bmatrix} \quad (105)$$

(3) 正特性抵抗素子の機構モデル

モータの過負荷保護を行なう正特性サーミスタの非線形抵抗特性は、図 7 3 の温度—抵抗比特性で表すことができる。

図 7 3 において、正特性サーミスタの温度 t_p に対する抵抗比の関係は、低温側に比べて高温側の変化が激しいため、抵抗比を対数で表してある。特性は、25 [℃] の基準温度の抵抗比を 1 とし、抵抗比が 2 倍になる温度を抵抗変態点として特性が定義される。図中の網掛で示す領域は、使用する正特性サーミスタの公差範囲である。この時の正特性サーミスタの温度特性は、図 7 3 で示すように低温側は負特性を示し、抵抗変態点付近から上の高温側では正特性となる複合特性になっている。モデル化にあたっては、この複合された 2 つの特性を合成した近似式で表すことにする。

低温側の抵抗比は、温度の逆数で表される負特性サーミスタの一般式から、以下のようなになる。

$$\psi_{p-L} = \exp \left\{ B_{PL} \left(\frac{1}{273+t_x} - \frac{1}{273+T_{PL}} \right) \right\} \quad (106)$$

高温側の抵抗比は、式（１０６）で示す温度項を反比例から比例にした、正特性の近似式で表すことにする。式は次のようになる。

$$\psi_{P_H} = \exp\left\{\frac{1}{B_{PH}}(t_P - T_{PH})\right\} \quad (107)$$

式（１０６）と式（１０７）により、正特性サーミスタの非線形抵抗の近似式は、以下のようになる。

$$R_P = R_{PS}(\psi_{P_L} + \psi_{P_H}) \quad (108)$$

ここで、 t_P は、正特性サーミスタの温度〔℃〕

R_P は、温度 t_x における抵抗値〔Ω〕

R_{PS} は、基準温度 25〔℃〕における基準抵抗値

ψ_{P_L} 、 ψ_{P_H} は、低温側と高温側の抵抗比

T_{PL} は、抵抗比が 1 になる基準温度〔℃〕

T_{PH} は、高温側に遷移する抵抗変態点の温度〔℃〕。

B_{PL} は、負特性サーミスタの B 特性に相当する定数〔K〕

B_{PH} は、正特性サーミスタの B 特性と仮定した定数〔K〕

素子メーカーが公開している正特性サーミスタの特性値を表 12 に示す。この特性を式（１０６）と式（１０７）に適用した抵抗特性を、図 73 のハッチングされた太線で示す。

【表 1 2】

正特性サニスタの仕様と特性

特性名	記号	単位	特性値	条件
基準温度	T_{PL}	[°C]	25.1	
基準抵抗	R_{PS}	[Ω]	0.5	公差 ±20[%]
抵抗変態点温度	T_{PH}	[°C]	100.0	公差 ±5[°C]
負特性B定数	B_{PL}	[K]	400.0	
正特性B定数	B_{PH}	[K]	7.6	

図73において、モータ巻線が損傷しない抵抗変態点の100[℃]付近までは抵抗変化も少なく低抵抗となっているが、モータに過負荷電流が流れると正特性サーミスタの消費電力 P_p が増加して、そのジュール熱で自己加熱を起こす。この自己加熱は、更に正特性サーミスタの温度上昇 t_{pu} を伴い、抵抗変態点付近から抵抗値が急激に増加して更に加熱が進む。しかし、急激な抵抗値増加でモータ電流は減少し、正特性サーミスタの加熱と放熱の平衡点で安定し温度 t_p に落ち着く。この時の電流は、モータが焼損する上限に対し少ない値を維持する。

次に、過負荷保護を支配している正特性サーミスタの自己加熱と放熱については、前で述べたモータ巻線と同様に温度上昇 t_{pu} [deg]を熱放散定数 δ_p [W/deg]から求める。また温度上昇 t_{pu} [deg]の途中経過は、正特性サーミスタの熱時定数 τ_p から求め、これに周囲温度 t_F [℃]を加えたものが正特性サーミスタに蓄積される温度 t_p [℃]となる。また、 t_p は雰囲気温度[℃]である。これらの関係を機構モデルで表すと図74になる。

(4) モータロック状態の定常機能モデル

ここでは、モータ回転が強制的に停止したときの、モータロック状態の過電流と正特性サーミスタの挙動を検討し、過負荷保護特性の実用性を検証する。モータロック状態の条件を織り込んだ定常機能モデルを、図75に示す。

図75において、 $R_p \cdot R_M$ はロック電流 I_{0_L} による自己加熱で抵抗値が変化し、その他は変化しない。同図のブラシ電圧降下 E_{MB} については、モータが停止状態なので $E_{MB}=0$ とすべきであるが、停止中も電機子が微振動を起こすのでブラシ電圧降下を考慮する。また、同図は、誘起電圧 V_o を発生しないので、直列接続の各電気抵抗が直接電池に接続されて、モータには過大なロック電流 I_{0_L} が流れる。

図75の機能モデルの数学モデルは、次式となる。

$$I_{0_L} = \frac{E_0 - E_{MB}}{R_B + R_p + R_M} \quad (109)$$

式(109)は、電源がON状態なので操作スイッチは $S_{WE}=S_{WA}=1$ となっている。

(5) シミュレーション結果

図 7 5 の機能モデルと各機構モデルを表 1 3 のパラメータで行ったシミュレーション結果を図 7 6 に示す。尚、表 1 3 のモータ巻線抵抗の熱放散係数 δ_M ・熱時定数 τ_M と正特性サーミスタの熱放散係数 δ_P と熱時定数 τ_P については、重点をモータ電流の精度においた同定で求めた。

【表 13】

正特性サーミスタとモータの熱特性

特性名	記号	単位	特性値
正特性サーミスタ熱時定数	τ_P	[sec]	25.5
正特性サーミスタ熱放散係数	δ_P	[W/deg]	0.018
巻線抵抗の基準温度	T_{MS}	[°C]	25.0
巻線の温度係数	α_U		43.0×10^{-3}
モータ巻線の熱時定数	τ_M	[sec]	3.2
モータ巻線の熱放散係数	δ_M	[W/deg]	0.58

図76の上側は、正特性サーミスタの電流 I_{o_L} [A]・電圧 V_p [V] を細く濃い線の実測データと太く薄い線の計算結果を表し、これに消費電力 W_p [W] の計算結果が追加されている。2番目は、モータロック電流 I_{o_L} [A] の実測値と計算結果の電流偏差 ΔI_{ERR} [A] である。3番目は、正特性サーミスタの温度 t_p [°C] と抵抗 R_p [Ω] の計算結果である。4番目は、モータの巻線温度 t_M [°C]、巻線抵抗 R_M [Ω]、消費電力 W_M の計算結果で、巻線抵抗 R_M [Ω] については基準温度 25 [°C] の抵抗 R_{MS} [Ω] との差で表してある。図中の縦の点線は、 $t_p = 100$ [°C] の抵抗変態点を示し、この点を境に各特性が急激に変化している。この結果から、非線形モデルの同定結果は、実測データと良く一致していることがわかる。

図76の結果について解釈を加える。正特性サーミスタの挙動は、14.5 [sec] のところで抵抗変態点に達し、ここから電流が急激に下がり電圧は上昇している。これは、この抵抗変態点を境にモータの過電流が遮断され始めることを意味する。この時の遮断状態（右端の値）は、電流 $I_{o_L} = 0.21$ [A]・電圧 $V_p = 9.65$ [V]・抵抗 $R_p = 45.9$ [Ω] となり約9.2倍増加している。また消費電力 W_p は、電流は減少するが電圧が高いので、正特性サーミスタの温度 $t_p = 134.2$ [°C] を維持するための電力 $W_p = 2.14$ [W] が供給されている。モータ巻線の状態は、巻線の最高温度が $t_M = 71.7$ [°C] で抵抗変態点から右側の遮断領域では温度 $t_M = 32.7$ [°C]・消費電力 $W_M = 0.144$ [W] に低下し、巻線の焼損を防止することが判る。

熱放散係数 δ_M ・熱時定数 τ_M と熱放散係数 δ_p ・熱時定数 τ_p の同定は、前に述べたモータ特性と同じ方法で行った。この時の概要を述べると、以下ようになる。図76におけるロック電流 I_{o_L} が強制停止後徐々に低下するのはモータ巻線の熱放散係数 δ_M と熱時定数 τ_M の影響による。また抵抗変態点に達する時間は、正特性サーミスタの熱放散係数 δ_p と熱時定数 τ_p に強く支配されている。両者を ±10 [%] 変化した時の抵抗変態点に達する時間は、 δ_p が 15.8 (+9.2%) ~ 13.1 (-9.4%) [sec]、 τ_p が 16.24 (+12.3%) ~ 12.8 (-11.5%) [sec] である。参考としてモータ巻線の場合を示すと、 δ_M が 14.36 (-0.7%) ~ 14.56 (+0.7%)、 τ_M が 14.16 (-2.1%) ~ 14.84 (2.6%) [sec] となり抵抗変態点に対する影響が少ないこと

がわかる。尚、() は、図 7 6 の抵抗変態点の時刻 14.5 [sec] に対する % 値である。

ここで行った同定は、前に述べた機能モデルの同定に対し、その内部特性を決定する機構モデルの同定を行ったこととなる。この方法は、非線形要素を含む機能・機構モデルを独立したモデルとして個別に同定できることを意味する。

(非線形を含む機能モデルの処理手順)

これまでに述べた内容を整理し、機能モデルとこれに組み込まれた機構モデルによるシミュレーションを実行する基本手順について、簡単に触れておく。

まず、線形機能モデル(支配方程式)に組み込まれる非線形パラメータとスイッチ要素の機構モデル(数学モデル)は、事前に計算してその結果を代入して更新する。従って、処理手順は、最初に機構モデルを実行して代入量を求め、次に線形機能モデルを実行する。この手順を処理フローで示すと、図 7 7 となる。

図 7 7 は、小規模な機能モデルの支配方程式を離散化して実行する時の基本的な処理の流れである。図中の計算開始から終了までの繰り返しは、標本化周期を単位として行ない、この中で推定観測量の予測計算を行なう。実際に運用されるコンピュータソフトウェアは、標準化された実行環境のソフトウェアモジュール中に、全系の機能・機構モデルモジュールが入れ子方式で組み込まれる。この時の各機構モデルは、標準関数として用意された機構モデル用モジュールを、使用目的に応じて呼び出しながら実行する。

ここでは、計算の実行の準備として初期化を行なった後、計算が開始される(ステップ a)。

この計算では、次期標本化時期用の、非線形パラメータとスイッチ要素の機構モデルについて計算する。具体的には、非線形パラメータ算出のための機構モデルについて計算を実行し(ステップ b)、条件判定を実行し(ステップ c)、蓄積要素等の、線形機能モデル実行前の初期化を行なう(ステップ d)。

次に、上記のようにして求めた非線形パラメータやスイッチ要素の状態等を機能モデルへ代入し(ステップ e)、上記の次期標本化時期に関し、機能モデルを実行する(ステップ f)。

さらに次にも標本化周期が続くときは(ステップ g)、ステップ h に移り、今計

算した標準化周期の計算結果から、次の標準化周期の推定観測量の予測計算を行ない、その計算により求められた推定観測量が機構モデルに渡される。

機構モデルではその推定観測量に基づいて、その推定観測量に対応する標準化時期に関する非線形パラメータ等の計算が実行され、機能モデルに渡される。

これらの過程を繰り返すことで、非線形系を含む系の再現（シミュレーション）が行なわれる。

（参考資料）

1. モデル化の記号

（1）線形モデルの記号

モデルを表すブロック線図は、一般的なブロック線図の規則を踏襲し、これに図 7 8 に示す記号を加えてモデル化する。図 7 8 で示す記号は、主に線形のモデルで使用する。

（2）非線形モデルの記号

雑多の種類がある非線形のモデル化には、それぞれに応じた表現法があるが、要は、非線形性の内容・性質・働きなどをモデル化する規則と方法を明らかにして視覚的に理解し、かつ数学モデルに変換可能な表現であればモデル化の目的を満たす。図 7 9 に非線形のモデル化に使用する代表的な記号を示す。

（3）非線形の信号

（1）操作量

操作量とは、位差量・流動量以外の絶対値・符号・状態量の自乗などの変換された物理量と、スイッチ演算子などを操作する 0 (False) と 1 (True) などの論理的な信号を指す。ただし、入れ子構造にした機構モデルから組み込み相手の機能モデルのスイッチ要素を操作する場合は、次の代入量で表わすことが望ましい。尚、速度を積分した位置や変位なども、これで表わす場合がある。

（2）代入量

代入量とは、機構モデルからパラメータに値を代入する線を指す。代入量の信号線名は、これらの非線形パラメータの変数名と同一名称にできる。この代入量によって機能モデルから機構モデルを独立させることができる。そして、この代入量の切り替が、非線形パラメータと機構モデルを入れ子方式にする。

(4) 論理演算子

スイッチ要素には論理演算子を使用し、この操作に条件判定・推定観測量などを使用する。

(a) 推定観測量

条件判定などで一つ先の標準化周期の状態量を観測する記号がある。この記号が指定された状態量は、現時点(k)の支配方程式を実行後、内部状態量の従属変数を独立変数に代入して再度推定観測方程式を実行し、次の標準化時期(k+1)の状態量を推定する。この推定観測量が、ここで提案するモデル化手法で非線形要素をモデル化するために必要な概念の一つである。

(b) 論理演算子

スイッチ要素に使用する論理演算子については、後で詳しく説明する。本論文では、スイッチ演算子を総称してスイッチ要素と呼ぶ。

(5) 非線形演算子

非線形演算子は、機能モデルに組み込む機構モデルのモデル化を行うための記号で、主に観測量又は操作量の変換に使用する。

(a) 絶対値

状態量・操作量の符号を除いた絶対値を取り出す。数学モデルでは、 b l a b s (A) などの表現で記述する。

(b) 符号

状態量・操作量から正負(±)の符号を取り出す。数学モデルでは、 b = s i g n (a) などの表現で記述する。

(c) 2乗

状態量・操作量を2乗した値の操作量を生成する。この記号は、2個以上の入力を乗算する記号と同じで、1入出力のときは2乗記号となる。

(d) 初期化(積分)

初期化は、条件判定またはスイッチ要素を介して積分記号の値を初期化する。初期化の実行時期は、機構モデルやスイッチ要素を実行する前に行うが、実行後に行う場合もある。代表的な初期化の方法を、図80に示す。同図は、(a)の条件が不成立の時に積分値xを0にリセット、(b)の条件が成立した時に積分値xをB

に初期化、(c)の条件が不成立の時に積分値 x を B に初期化する方法である。これらの数学モデルは、以下ようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } (A \neq 0) \text{ then } (\cdots\cdots) \text{ else } (x = 0) \\ \text{if } (A = 0) \text{ then } (S_{WA} = 1, x = B) \\ \text{if } (A \neq 0) \text{ then } (S_{WA} = 1) \text{ else } (S_{WA} = 0, x = B) \end{array} \right\} \quad (110)$$

初期化のモデルには、積分記号と(a)の条件判定又は(b)・(c)のスイッチ記号の間に、条件判定で操作できない加算記号などのモデルを組み込んではならない。

(e) 条件判定

条件判定は、図79で示す推定観測量の記号で観測された次の標準化時期の観測量や、機構モデル内で生成された操作量からスイッチ要素の操作量を生成する記号で、条件判定式には、大小関係・等値関係・論理演算などの演算子を使用する。演算結果は、成立したとき1(true)を不成立のとき0(false)の操作量を出力する。この場合の操作量又は代入量を示す白抜きの矢印には、操作変数名がつけられる。また、本論文では、条件判定の数学モデルを、C言語など一般的に使用されているIF文で記述する。

(6) 関数式

状態量・操作量の関数値を操作量として取り出す指定を行う。例えば関数名 $\sin()$ の枠内に A を入力し B を出力する指定は、 $B = \sin(A)$ の数学モデルを意味する。

(7) 操作

モデルを外部から操作する信号を生成する。例えば、スイッチの操作などがある。

(8) ON-OFFスイッチ

一般的なON-OFFスイッチの働きを、電気系で使用される接点式開閉器と対応させて示すと、図81になる。

同図の左側 (a) に示すNOスイッチ (Normal Open Switch) は常時OFFのスイッチで、右 (b) に示すNCスイッチ (Normal Close Switch) は常時ONのスイッチである。図81 (a) のNOスイッチ要素の数学モデルは、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} & f(O_P) \text{ then } (S_{WON} = 0) \text{ else } (S_{WON} = 1) \\ & I_o = I_i S_{WON} \end{aligned} \right\} \quad (111)$$

図81 (b) のNOスイッチ要素の数学モデルは、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} & f(O_P) \text{ then } (S_{WOFF} = 1) \text{ else } (S_{WOFF} = 0) \\ & I_o = I_i S_{WOFF} \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

式(111)と(112)の上側が条件判定式、下側が状態量を操作するスイッチ要素の式である。式(111)のNOスイッチは、条件判定式 O_P が成立した時スイッチ要素 S_{WON} が1になりONにする。成立しない時は S_{WON} が0になりOFFにする。また、式(112)のNCスイッチは、式(111)とは逆に条件判定式 O_P が不成立の時 S_{WOFF} が1になってスイッチONにし、成立した時 S_{WOFF} が0になりスイッチOFFにする。

(9) 論理積・論理和

論理積 (AND) と論理和 (OR) は、ファジー演算のMin-Max法の論理積と論理和に対応する論理演算である。論理積は、入力された状態量の最小値を選択して出力する機能をもつ記号で、図82と図83が2入力論理積と論理和をスイッチ要素と対比して表した例である。

図82において、論理積の内部には出力を共通にするNOスイッチ要素群とその中の最小状態量を選択する条件判定を持ち、図83において、論理和は最大状態量を選択する条件判定を持つ。両者は、条件判定の判定式以外、同一モデルである。

図 8 2 (b) の論理積の数学モデルは、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{if } (I_A < I_B) \text{ then } (S_{W_0} = 0, S_{W_1} = 1) \text{ else } (S_{W_0} = 1, S_{W_1} = 0) \\ & I_o = I_A S_{W_1} + I_B S_{W_0} \end{aligned} \quad (113)$$

図 8 3 (b) の論理和の数学モデルは、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{if } (I_A > I_B) \text{ then } (S_{W_0} = 0, S_{W_1} = 1) \text{ else } (S_{W_0} = 1, S_{W_1} = 0) \\ & I_o = I_A S_{W_1} + I_B S_{W_0} \end{aligned} \quad (114)$$

2. 線形モデルの基本機能要素

(1) 状態量

状態量は、次の流動量と位差量に分けることができる。

①位差量とは、電圧・速度・流速などのエネルギーを運ぶ媒質の移動量や多さを表す状態量を指す。

②流動量とは、電流・力・流体圧力などの単位量の媒質が有するエネルギーの強さや量を表す状態量を指す。

この流動量と位差量は、その対がエネルギーとなる組み合わせで使用する。例えば、電圧と電流の積が電力になり、速度と力の積が仕事率になることをモデル化に利用する。このことは、機能モデルの根幹がエネルギー原理にあり、系のモデルを位差量と流動量で表し、両者に関係する物理法則がモデル上で全て表せることを意味する。

この位差・流動量は、その積分値をエネルギーの多さや強さの蓄積量とし、例えば機械系の移動位置と力積などに対応する。更に、熱力学のエントロピーを構成する内部エネルギーとして、気体の圧縮や抵抗損失などの熱エネルギーに関係する温度なども蓄積量となる。ここでは、これらを総称して蓄積状態量呼ぶ。また、位差

量とその蓄積量で接続される系を位差系と呼び、同様に流動量の系を流動系と呼び、両者は互いに双対関係となる。この両系は、機械や電気理論の根幹であり、機械工学では流動系の力（圧力）を基本にして位差系の速度またはその積分量の距離（位置）を結果として扱い、電気工学では位差系の電圧を基本にして流動系の電流を結果として扱う理論体系と見ることができる。ここで述べるモデル化手法は、この位差・流動系を等価に扱い両者間の双対性を利用して、各工学分野の理論や法則を相互乗り入れして垣根を取り払う手法となっている。

（２）パラメータ

（a）特性

特性は、流動量と位差量を関係付けるものであり、系の性質を表す。エネルギーを蓄積する蓄積特性と電気抵抗や粘性減衰のようにエネルギー損失を伴う損失特性の２種類に分けられる。また、この特性は、位差量と流動量の積で表すエネルギー（運動エネルギー）を生成し、同時に内部に生成された熱や位置などのエネルギーを生成する。この内部エネルギーは、温度や距離に変換して出力状態量に持たすことができる。尚、多次元空間で置かれる特性は、内部に作用方向を指定する座標情報を持つ。

①蓄積特性は、インダクタンスやばねこわさのように、流動量の変化をエネルギーとして蓄え位差量に変えるものと、電気容量や質量のように位差量の変化をエネルギーとして蓄え流動量に変えるものに分けられる。

②損失特性は、電気容量の漏洩抵抗や流体による粘性抵抗のように位差量に依存する損失を流動量に変えるものと、電気抵抗や材料圧縮による内部減衰のように流動量に依存する損失を位差量に変えるものに分けられる。

（b）係数

係数とは、流動量同士または位差量同士を関係付ける数や量のことで、次の４種類に分けられる。

①変圧器巻数比や歯車比のように、同一の物理単位系同志を関係付ける無単位量。尚、数学モデル上に表れる値が１の係数の場合、要素間の直結を意味する。

②モータのトルク定数と速度定数・タイヤ半径・ピストン断面積など、異なる物理単位系同志を関係付ける有単位量。また、タイヤの回転と並進運動のように異なる

る物理単位系が直交する場合は、物理係数に座標変換の機能を必要とする。

③多次元座標空間で運動するリンク機構や車の運動などの状態量の座標系を変換する無単位量。

④損失率や制御系のゲインのように、対となる位差量または流動量の片側に係数を掛けてエネルギーの増減を伴う無単位量。

上記①～③の係数は、対となる位差量と流動量の双方に同一係数を掛け、エネルギーの増減を伴わないように変換する。この位差量と流動量に共通の意味を持つ係数を適用する変換係数の概念は、機能モデルの特長の一つであり、この概念が物理単位系を超えたモデル化、および同じモデル内に異なる物理単位系を同居させることを可能にする理由の一つである。また、蓄積特性や損失特性に対し、この係数は2乗で作用する重み係数の働きを持っている。

(c) スイッチ要素

スイッチ要素とは、機能モデル内部の状態量を接続・開放する論理要素で、これが組み込まれた機能モデルは、モデル構造を変化させる非線形モデルとなる。この要素の係数値は、1 (true) と0 (false) または $1 \cdot 0 \cdot -1$ の無単位量で状態量を断続する特殊用法の係数と考えることができる。

(d) 側負荷

側負荷とは、モデル内部で状態量の生成または吸収する働きをし、位差量と流動量に対応した2種類がある。この側負荷は、対にならない単独の位差量または流動量を全て側負荷とし、系内部から未拘束の状態量を排除する意味を持っている。

①電池の内部電圧・ダーオードの電圧降下・機器の周囲温度のように、位差量に対応したもの

②摩擦トルク・クラッチの伝達トルク・一定の電流を供給する電流源のように、流動量に対応したもの

③側負荷の働きは、電池の内部電圧のように状態量を生成する発生源と、摩擦トルクのように状態量を吸収する吸収源に分かれる。この両者はモデルに組み込まれることで生成または吸収の働きがきまる。

④特殊な用途として、運転者などの操作や指示を信号として表す場合がある。

What is claimed is:

1. 所定の第1の状態量を入力し入力された第1の状態量に非線形変換処理を施すことにより第2の状態量を生成して出力する非線形特性再現装置において、

設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に、各標本化時期ごとに線形変換する状態量変換部と、

前記第1の状態量および前記第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいは該状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量に基づいて、該次期標本化時期における変換のための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを、前記状態量変換部に設定する非線形特性再生部とを備えたことを特徴とする非線形特性再現装置。

2. 前記非線形特性再生部は、前記推定観測量を入力するとともに1つ以上の変数を入力し、これら入力された推定観測量および1つ以上の変数に基づいて、前記変換パラメータを求めるものであることを特徴とする請求項1記載の非線形特性再現装置。

3. 前記非線形特性再生部は、次期標本化時期における第2の状態量の推定値が前記推定観測量で規格化されてなる規格化推定値を、前記変換パラメータとして求めるものであることを特徴とする請求項1記載の非線形特性再現装置。

4. 前記非線形特性再生部は、次期標本化時期における第2の状態量の推定値を前記推定観測量の絶対値で除算又は微分することにより、前記変換パラメータとしての前記推定観測量を求めるものであることを特徴とする請求項3記載の非線形特性再現装置。

5. 前記非線形特性再現装置が、非線形バネの特性を再現する装置であって、

前記状態量変換部は、非線形バネ両端の速度差と、該非線形バネの荷重変化ととの間の変換を行なうものであり、

前記非線形特性再生部は、非線形バネ両端の速度差の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の非線形バネ両端の速度差と該非線形バネの荷重変化との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを前記状態量変換部に設定するものであることを特徴とする請求項1記載の非線形特性再現装置。

6. 前記非線形特性再現装置が、空気バネの特性を再現する装置であって、

前記状態量変換部は、空気バネの変形速度と、該空気バネの内部圧力変化との間の変換を行なうものであり、

前記非線形特性再生部は、空気バネの変形速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の空気バネの変形速度と該空気バネの内部圧力変化との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを前記状態量変換部に設定するものであることを特徴とする請求項1記載の非線形特性再現装置。

7. 前記非線形特性再現装置が、リンク機構の特性を再現する装置であって、

前記状態量変換部は、リンク機構の支点部の速度あるいは角速度の値を変換するものであり、

前記非線形特性再生部は、リンク機構の支点部に加わる速度あるいは角速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象のリンク機構の支点部の速度あるいは角速度の値を変換するための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを前記状態量変換部に設定するものであることを特徴とする請求項1記載の非線形特性再現装置。

8. 前記状態量変換部は、前記非線形特性再生部により設定された、リンク機構の支点部の速度あるいは角速度の値の変換に用いる変換パラメータと同一の変換パラメータを用いて、該支点部の速度あるいは角速度の値を変換するとともに、該支点部に加わる力あるいはトルクの値を変換するものであることを特徴とする請求項7記載の非線形特性再現装置。

9. 前記非線形特性再現装置が、摩擦を伴って移動する物体の特性を再現する装置であって、

前記状態量変換部は、物体に加わる力と該物体の移動速度との間の変換を行なうものであり、

前記非線形特性再生部は、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、該次期標本化時期における、特性再現対象の物体に加わる力と該物体の移動速度との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを前記状態量変換部に設定するものであることを特徴とする請求項1記載の非線形特性再現装置。

10. 前記非線形特性再生部は、前記物体に加わる摩擦力を前記変換パラメータとして求めて前記状態量変換部に設定するものであり、

前記状態量変換部は、前記物体に加わる力から前記状態量変換部により設定された摩擦力を減じた力を摩擦力の作用が無視された物体に加えた場合の、該力と該物体の移動速度との間の変換を行なうものであることを特徴とする請求項9記載の非線形特性再現装置。

11. 前記非線形特性変換部は、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、該次期標本化時期における、特性再現対象の物体に加わる動摩擦力を求める動摩擦生成部と、物体に加わる力の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、該次期標本化時期における、特性再現対象の物体に加わる静摩擦力を求める静摩擦生成部と、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、前記動摩擦生成部で生成された動摩擦力和前記静摩擦生成部で生成された静摩擦力とのうちの一方の摩擦力を選択して、選択した摩擦力を前記状態量変換部に設定する摩擦力切替部とを有するものであることを特徴とする請求項10記載の非線形特性再現装置。

12. 前記動摩擦生成部が、物体の移動速度の次期標本化時期の推定観測量に応

じて値の異なる動摩擦力を求めるものであることを特徴とする請求項 1 記載の非線形特性再現装置。

13. 前記非線形特性再現装置が、角速度に応じて慣性モーメントが変化する可変慣性モーメント機構の特性を再現する装置であって、

前記状態量変換部は、可変慣性モーメント機構に加わるトルクと該可変慣性モーメント機構の角速度との間の変換を行なうものであり、

前記非線形特性再生部は、可変慣性モーメント機構の角速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、次期標本化時期における、特性再現対象の可変慣性モーメント機構に加わるトルクと該可変慣性モーメント機構の角加速度との間の変換を行なうための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを前記状態量変換部に設定するものであることを特徴とする請求項 1 記載の非線形特性再現装置。

14. 特性再現対象の可変慣性モーメント機構が、遠心力に応じて半径方向に並進する並進部材を有するものであって、

前記非線形特性再生部は、前記可変慣性モーメント機構の角速度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、前記並進部材に加わる遠心力を求める回転並進変換部と、前記回転並進変換部で求められた遠心力による前記並進部材の並進運動を再現する並進運動再現部とを備え、前記並進運動再現部により再現された前記並進部材の並進運動に応じた変換パラメータを求めて前記状態量変換部に設定するものであることを特徴とする請求項 13 記載の非線形特性再現装置。

15. 線形系の特性を再現する線形モデル部と、該線形モデル部から、相互に非線形変換の関係にある第 1 の状態量および第 2 の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいは該状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、前記第 1 の状態量と前記第 2 の状態量との間の、該次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求める非線形モデル部とを備え、

前記非線形モデル部における次期標本化時期の変換パラメータを求める演算と、前記線形モデル部における、前記非線形モデル部で求められた次期標本化時期の変

換パラメータを用いた前記第1の状態量と前記第2の状態量との間の線形変換を含む線形演算とを交互に繰り返すことを特徴とする非線形特性再現装置。

16. 前記非線形モデル部は、相互に非線形変換の関係にあるとともに少なくとも一方の状態量の種類が異なる第1の状態量および第2の状態量に関し、該第1の状態量および該第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいは該状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、該第1の状態量と該第2の状態量との、該次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求める、複数の非線形変換部を有するものであることを特徴とする請求項15記載の非線形特性再現装置。

17. 前記非線形特性再現装置が、ゼネバ機構の特性を再現する装置であって、前記線形モデル部は、ゼネバ機構の主部と従部との間の角速度どうしの線形変換と該ゼネバ機構の主部と従部との間のトルクどうしの線形変換とを含む線形変換を行なうものであり、

前記非線形モデル部は、ゼネバ機構の主部の角度の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、該次期標本化時期における、該ゼネバ機構の主部と従部との間の角速度どうしの変換と該ゼネバ機構の主部と従部との間のトルクどうしの変換との双方の線形変換に用いられる、該次期標本化時期において該ゼネバ機構の主部と従部とが連結されているか否かの情報を含む変換パラメータを求める非線形変換部を有するものであることを特徴とする請求項15記載の非線形特性再現装置。

18. 前記非線形特性再現装置が、ランプとサーミスタとが直列に接続された液体残量警告灯の特性を再現する装置であって、

前記線形モデル部は、ランプに印加される電圧と該ランプに流れる電流との間の変換と、サーミスタに印加される電圧と該サーミスタに流れる電流との間の変換とを含む線形変換を行なうものであり、

前記非線形モデル部は、ランプに印加される電圧の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、該次期標本化時期における該ランプの抵抗を求める第1の非線形変換

部と、サーミスタの消費電力の次期標本化時期の推定観測量に基づいて、該次期標本化時期における該サーミスタの抵抗を求める第2の非線形変換部とを有するものであることを特徴とする請求項15記載の非線形特性再現装置。

19. 1つ以上の変数を入力し、入力された1つ以上の変数に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される、次期標本化時期における論理値を求める論理判定部と、

所定の入力状態量を入力し、前記次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との関係が前記論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じた関係に切り替えられてなる出力状態量を出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする非線形特性再現装置。

20. 前記状態量切替部は、前記次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との接続関係が前記論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じた接続関係に切り替えられてなる出力状態量を出力するものであることを特徴とする請求項19記載の非線形特性再現装置。

21. 前記状態量切替部は、入力状態量を積分して出力状態量として出力するものであって、前記論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値が所定の論理値であった場合に、前記次期標本化時期において、初期値に切り替えられてなる出力状態量を出力するものであることを特徴とする請求項19記載の非線形特性再現装置。

22. 前記論理判定部は、複数の入力状態量の次期標本化時期における推定観測量に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される次期標本化時期における論理値を求めるものであり、

前記状態量切替部は、前記複数の入力状態量を入力して、前記次期標本化時期において、前記論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じて選択された入力状態量を出力状態量として出力するものであることを特徴とする請求項

19記載の非線形特性再現装置。

23. 前記非線形特性再現装置が、相対移動可能状態と相対移動不能状態とを有する2つの部材を含む機構の特性を再現する装置であって、

前記論理判定部が、前記2つの部材の相対位置もしくは該相対位置から導かれる状態量の、次期標本化時期における推定観測量に基づいて、前記2つの部材が相対移動可能状態にあるか相対移動不能状態にあるかを表わす論理値を求めるものであり

前記状態量切替部が、前記2つの部材の、相対移動速度と力の配分との関係を切り替えるものであることを特徴とする請求項19記載の非線形特性再現装置。

24. 前記非線形特性再現装置が、相対的に滑った滑り状態と相互に接続された接続状態とを有する2つの部材を含むクラッチ機構の特性を再現する装置であって

前記論理判定部が、前記2つの部材の相対角速度の次期標本化時期における推定観測量に基づいて、前記2つの部材が滑り状態にあるか接続状態にあるかを表わす論理値を求めるものであり、

前記状態量切替部が、前記2つの部材の相対角速度とトルクの配分との関係を切り替えるものであることを特徴とする請求項19記載の非線形特性再現装置。

25. 前記非線形特性再現装置が、駆動軸に制動エネルギーを加えるブレーキ機構の特性を再現する装置であって、

前記論理判定部が、ブレーキが駆動軸から受けているトルクの次期標本化時期の推定観測量に基づいて、駆動軸が回転状態にあるか静止状態にあるかを表わす論理値を求めるものであり、

前記状態量切替部が、駆動軸に与える制動トルクを切り替えるものであることを特徴とする請求項19記載の非線形特性再現装置。

26. 前記非線形特性再現装置が、可動部材にバネを作用させて該可動部材への

外力の付加が解除されたときに該可動部材が該バネの作用により初期状態に自動復帰するとともに該可動部材の可動範囲を制限するストッパが設けられてなる自動復帰機構の特性を再現する装置であって、

前記論理判定部が、前記可動部材の移動位置の次期標準化時期の推定観測量に基づいて、前記可動部材が前記ストッパに干渉したか否かを表わす論理値を求めるものであり、

前記状態量切替部が、前記可動部材の速度もしくは角速度と該可動部材に加わる力もしくはトルクとの関係を切り替えるものであることを特徴とする請求項 19 記載の非線形特性再現装置。

27. 所定の第 1 の状態量を入力し、入力した第 1 の状態量が所定状態にあるか否かに応じて非線形に切り替えられた第 2 の状態量を出力する非線形特性再現装置において、

前記第 1 の状態量の、現在の標準化時期から次期標準化時期に至る間の状態量変動幅を予測する状態変動推定部と、

前記第 1 の状態量の、現在の標準化時期における値と、該第 1 の状態量が所定状態にあるか否かを判定するための判定値との偏差を求める状態偏差検出部と、

前記状態変動推定部で予測された状態量変動幅と前記状態偏差検出部で求められた偏差との大小に基づいて次期標準化時期における非線形変化を予測した、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める安定状態判定部と、

前記安定状態判定部で求められた論理値に基づいて切り替えられた第 2 の状態量を出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする非線形特性再現装置。

28. 前記状態偏差検出部は、前記第 1 の状態量の現在の標準化時期における値と、該第 1 の状態量が所定の状態にあるか否かを判定するための、前記状態変動推定部で予測された状態量変動幅の正負に応じて異なる判定値との偏差を求めるものであることを特徴とする請求項 27 記載の非線形特性再現装置。

29. 設定された変換パラメータに基づいて、第 1 の状態量を第 2 の状態量に線

形変換する状態量変換部を含む、線形系の特性を再現する線形モデル部と、

前記線形モデル部から、所定の第1の観測状態量の次期標本化時期の推定観測量を取得し該推定観測量に基づいて前記変換パラメータを生成して前記状態量変換部に設定する非線形モデル部とを備え、

前記非線形モデル部が、

前記線形モデル部から前記第1の観測状態量と同一もしくは異なる所定の第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量を取得し、該第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、相対的に緩慢な挙動変化を示す第1の非線形系の特性が反映された緩慢変化状態量を生成する緩慢変化再生部と、

前記線形モデル部から取得した前記第1の観測状態量の次期標本化時期の推定観測量と、前記緩慢変化再生部で生成された前記緩慢変化状態量とに基づいて、相対的に急激な挙動変化を示す第2の非線形系の特性が反映された変換パラメータを生成して前記状態量変換部に設定する特性生成部とを有するものであることを特徴とする非線形特性再現装置。

30. 前記緩慢変化再生部は、

前記第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、前記緩慢変化状態量の、前記線形モデル部の状態が現状のまま継続したとした場合の無限時間経過後の定常値を求める定常値設定部と、

前記定常値設定部で求められた前記緩慢変化状態量の定常値と、既知の、前記第1の非線形系における前記緩慢変化状態量の、正規化された時間変化特性とに基づいて、該第1の非線形系の特性が反映された、前記特性生成部に渡す緩慢変化状態量を生成する正規化応答部とを備えたことを特徴とする請求項29記載の非線形特性再現装置。

31. 前記非線形特性再現装置が、温度変化に応じて抵抗値が変化する素子を有する系の特性を再現する装置であって、

前記状態量変換部は、抵抗値を表わす変換パラメータが設定され該抵抗値を持つ素子に印加された電圧と該素子に流れる電流と間の変換を行なうものであり、

前記定常値設定部は、前記素子で消費されるエネルギーの、次期標準化時期における推定観測量に基づいて、該素子の温度の、該素子で消費されるエネルギーが現状のまま継続したとした場合の無限時間経過後の定常値を求めるものであり、

前記正規化応答部は、前記定常値設定部で求められた、前記素子の温度の定常値と、既知の、前記素子で消費されるエネルギー変化に対する該素子の温度の時間変化を表す正規化されたステップ応答曲線とに基づいて、前記素子の温度を求めるものであり、

前記特性生成部が、前記正規化応答部で求められた温度に基づいて前記素子の抵抗値を表す変換パラメータを生成して前記状態量変換部に設定するものであることを特徴とする請求項 30 記載の非線形特性再現装置。

32. 前記正規化応答部が、さらに周囲温度の観測量にも基づいて、前記素子の温度を求めるものであることを特徴とする請求項 31 記載の非線形特性再現装置。

33. コンピュータを、所定の第1の状態量を入力し入力された第1の状態量に非線形変換処理を施すことにより第2の状態量を生成して出力する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に、各標準化時期ごとに線形変換する状態量変換部と、

前記第1の状態量および前記第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいは該状態量から導出される状態量の、次期標準化時期の推定観測量に基づいて、該次期標準化時期における変換のための変換パラメータを求めて、求めた変換パラメータを、前記状態量変換部に設定する非線形特性再生部とを有する非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする非線形特性再現プログラム記憶媒体。

34. コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラ

△記憶媒体において、

線形系の特性を再現する線形モデル部と、該線形モデル部から、相互に非線形変換の関係にある第1の状態量および第2の状態量のうちの少なくとも一方の状態量あるいは該状態量から導出される状態量の、次期標本化時期の推定観測量を取得して、前記第1の状態量と前記第2の状態量との間の、該次期標本化時期における線形変換に用いられる変換パラメータを求める非線形モデル部とを有し、

前記非線形モデル部における次期標本化時期の変換パラメータを求める演算と、前記線形モデル部における、前記非線形モデル部で求められた次期標本化時期の変換パラメータを用いた前記第1の状態量と前記第2の状態量との間の線形変換を含む線形演算とを交互に繰り返す非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする非線形特性再現プログラム記憶媒体。

35. コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

1つ以上の変数を入力し、入力された1つ以上の変数に基づいて、複数の離散的な値の中から選択される、次期標本化時期における論理値を求める論理判定部と、

所定の入力状態量を入力し、前記次期標本化時期において、入力状態量と出力状態量との関係が前記論理判定部で求められた次期標本化時期における論理値に応じた関係に切り替えられてなる出力状態量を出力する状態量切替部とを有する非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする非線形特性再現プログラム記憶媒体。

36. コンピュータを、所定の第1の状態量を入力し、入力した第1の状態量が所定状態にあるか否かに応じて非線形に切り替えられた第2の状態量を出力する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

前記第1の状態量の、現在の標本化時期から次期標本化時期に至る間の状態量変動幅を予測する状態変動推定部と、

前記第1の状態量の、現在の標準化時期における値と、該第1の状態量が所定状態にあるか否かを判定するための判定値との偏差を求める状態偏差検出部と、

前記状態変動推定部で予測された状態量変動幅と前記状態偏差検出部で求められた偏差との大小に基づいて次期標準化時期における非線形変化を予測した、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める安定状態判定部と、

前記安定状態判定部で求められた論理値に基づいて切り替えられた第2の状態量を出力する状態量切替部とを有する非線形特性再現プログラムが記憶されてなることを特徴とする非線形特性再現プログラム記憶媒体。

37. コンピュータを、非線形系を含む系の特性を再現する非線形特性再現装置として動作させる非線形特性再現プログラムが記憶された非線形特性再現プログラム記憶媒体において、

設定された変換パラメータに基づいて、第1の状態量を第2の状態量に線形変換する状態量変換部を含む、線形系の特性を再現する線形モデル部と、

前記線形モデル部から、所定の第1の観測状態量の次期標準化時期の推定観測量を取得し該推定観測量に基づいて前記変換パラメータを生成して前記状態量変換部に設定する非線形モデル部とを有し、

前記非線形モデル部が、

前記線形モデル部から前記第1の観測状態量と同一もしくは異なる所定の第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量を取得し、該第2の観測状態量の観測量もしくは推定観測量に基づいて、相対的に緩慢な挙動変化を示す第1の非線形系の特性が反映された緩慢変化状態量を生成する緩慢変化再生部と、

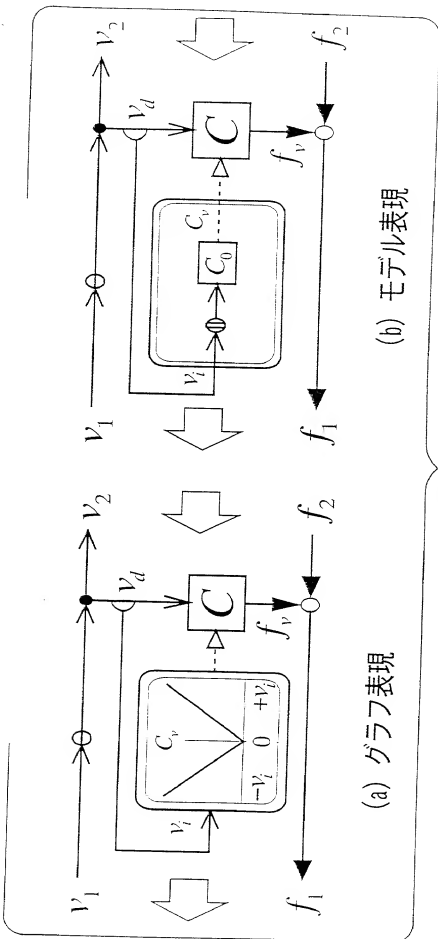
前記線形モデル部から取得した前記第1の観測状態量の次期標準化時期の推定観測量と、前記緩慢変化再生部で生成された前記緩慢変化状態量とに基づいて、相対的に急激な挙動変化を示す第2の非線形系の特性が反映された変換パラメータを生成して前記状態量変換部に設定する特性生成部とを有するものである非線形特性再現プログラムを記憶してなることを特徴とする非線形特性再現プログラム記憶媒体。

ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

【要約】

【課題】本発明は、状態量に非線形変換を施して出力する非線形特性再現装置に関し、製品や部品の非線形な挙動や振る舞いをモデル化して再現する。

【解決手段】入力状態量の、次期標本化時期における推定観測量を入力して、次期標本化時期における出力状態量の推定値が推定観測量で規格化されてなる規格化推定値を求める非線形特性再生部と、非線形特性再生部で求められた規格化推定値に基づく非線形演算により、次期標本化時期における入力状態量を次期標本化時期における出力状態量に変換する状態量変換部とを備えた。



(a) グラフ表現

Fig.1

(b) モデル表現

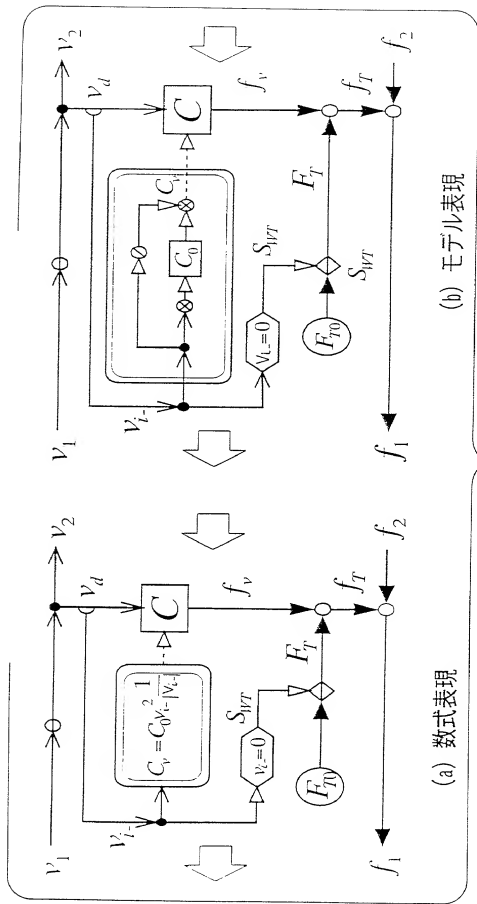


Fig. 2

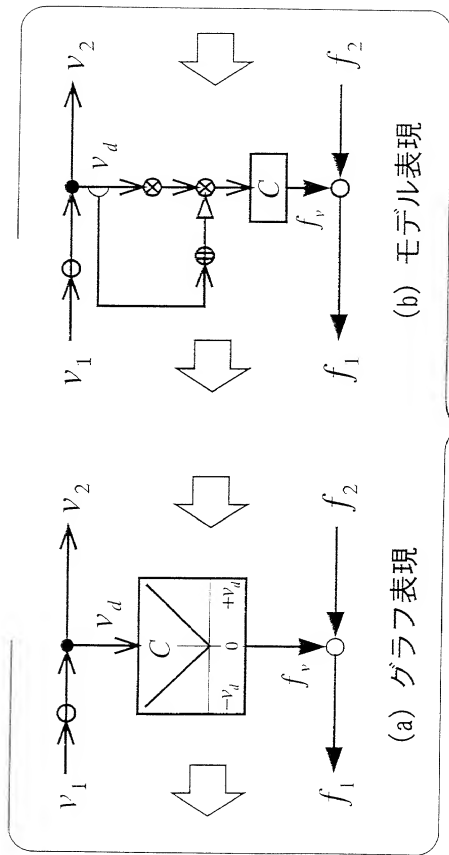


Fig. 3

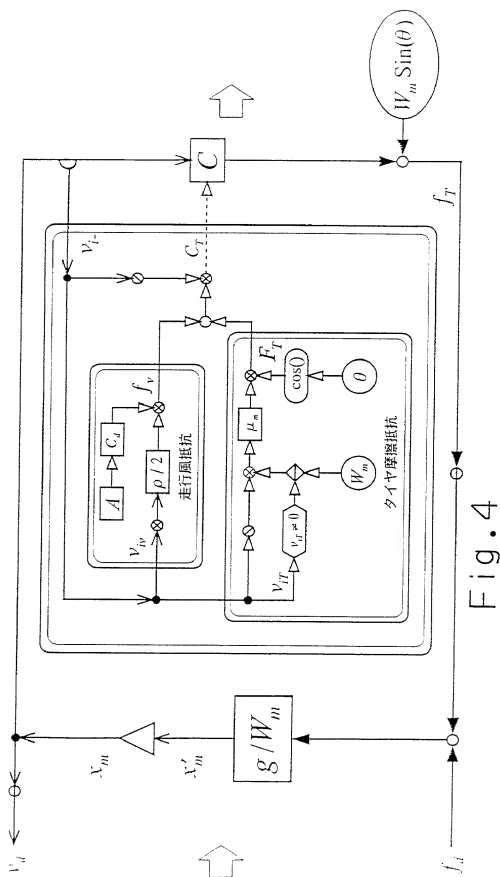


Fig. 4

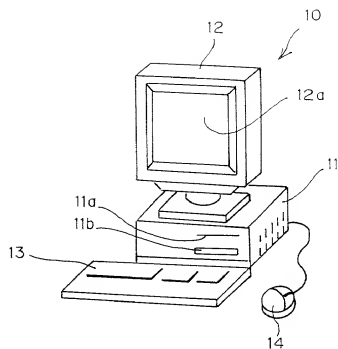


Fig. 5

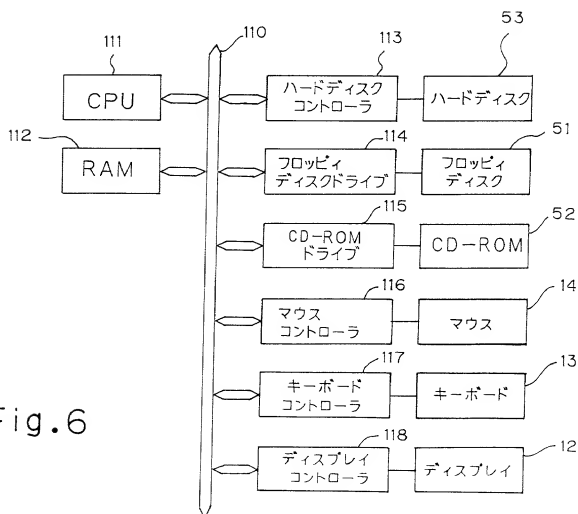


Fig. 6

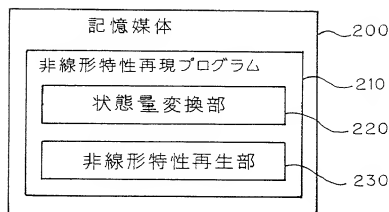


Fig.7

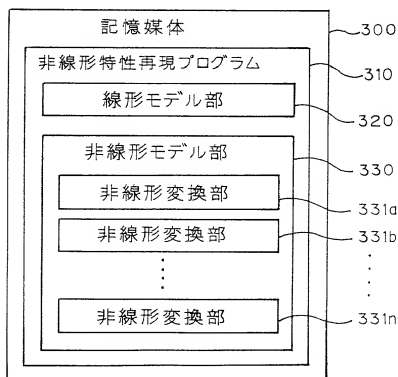


Fig.8

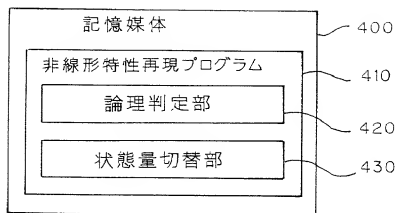


Fig.9

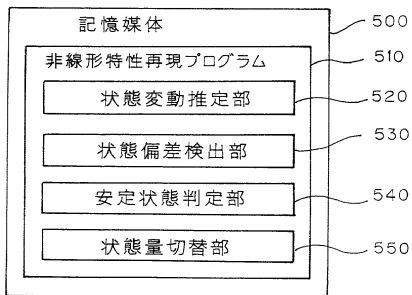


Fig.10

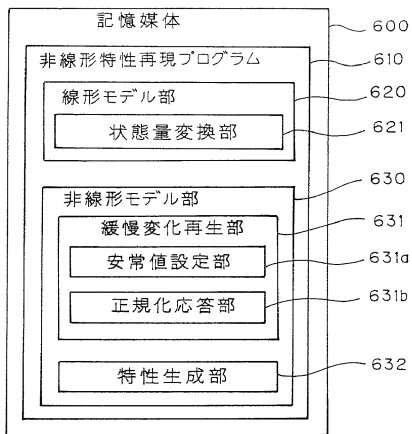


Fig.11

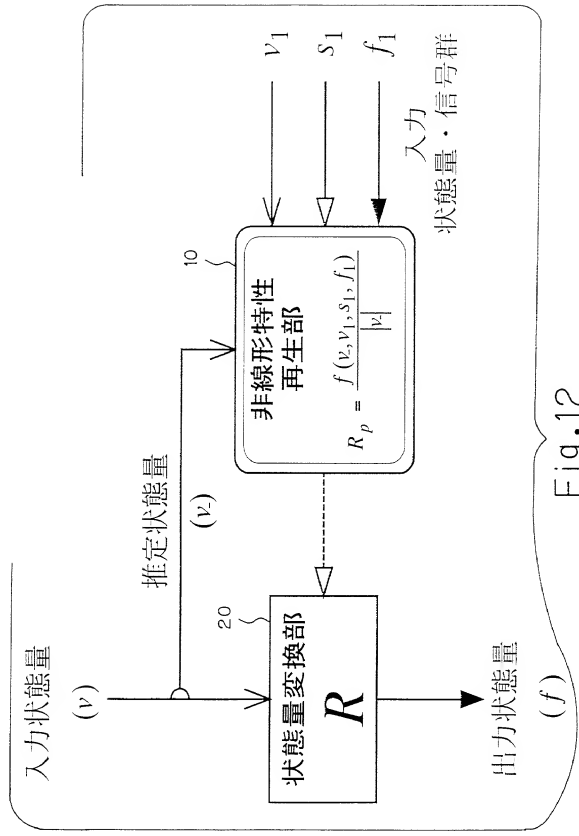


Fig.12

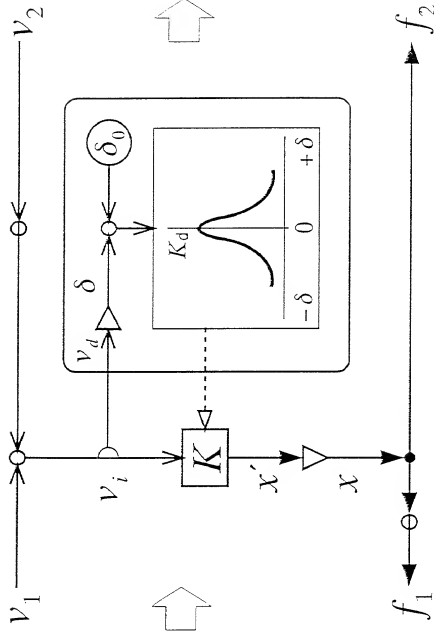
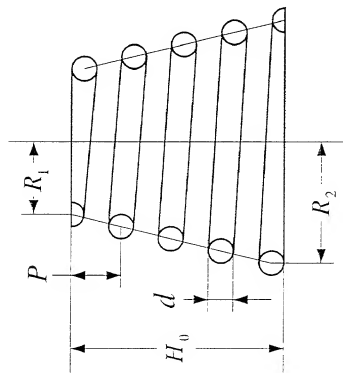
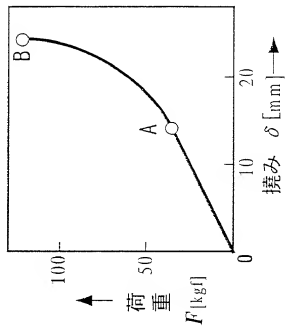


Fig. 13



(a)



(b)

Fig.14

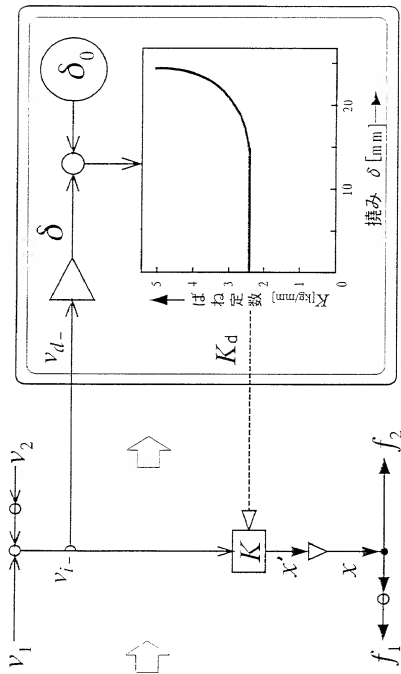


Fig.15

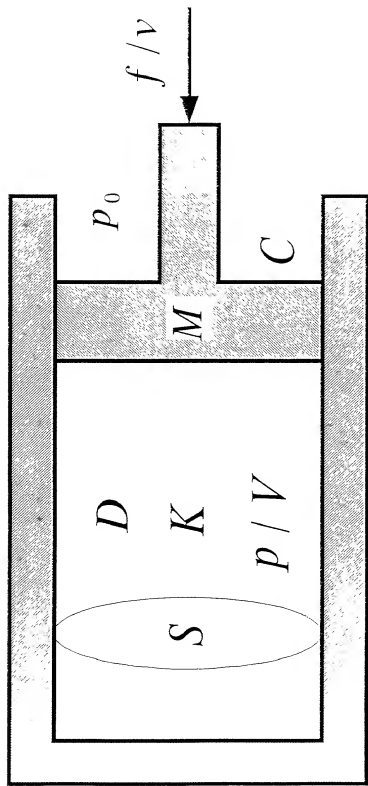


Fig.16

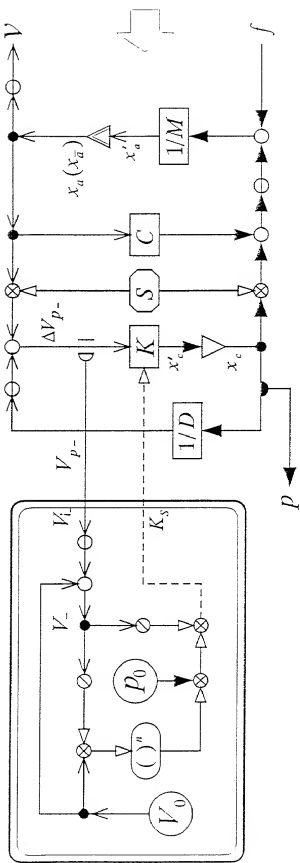


Fig. 17

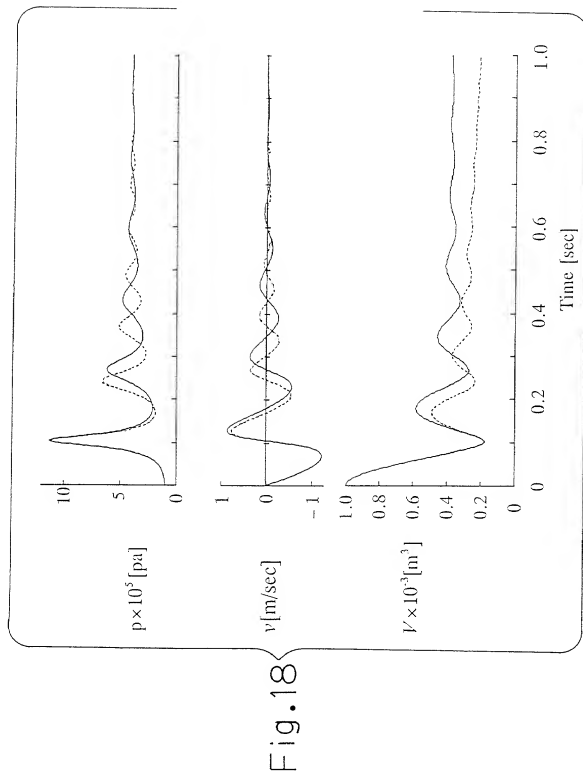
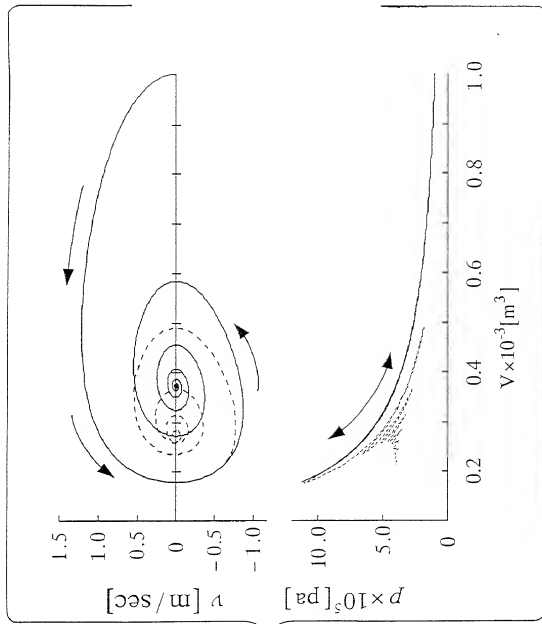


Fig.19



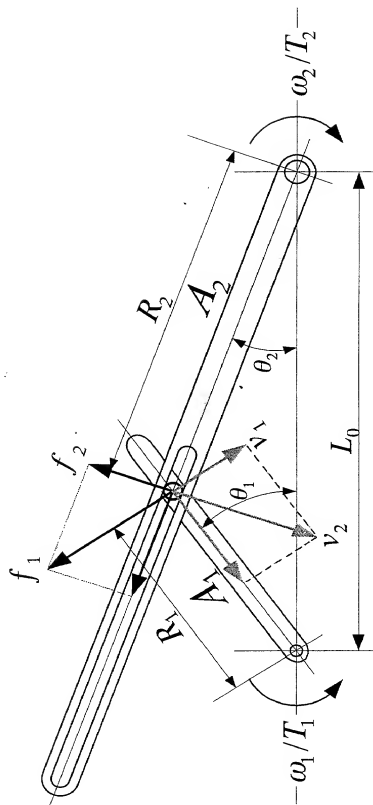


Fig.20

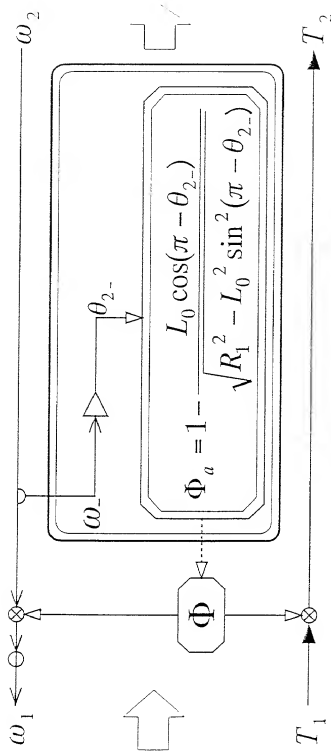


Fig.21

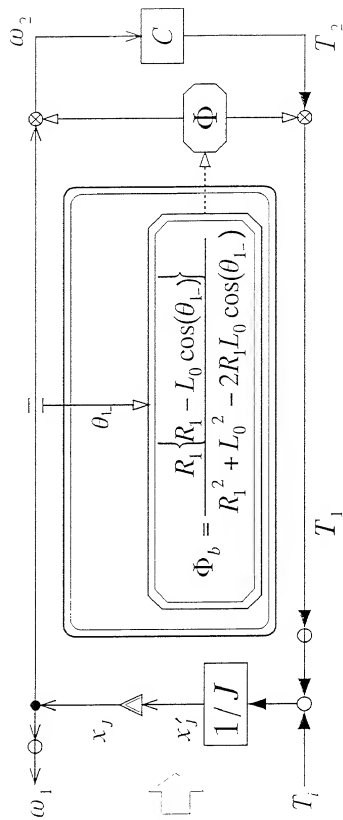
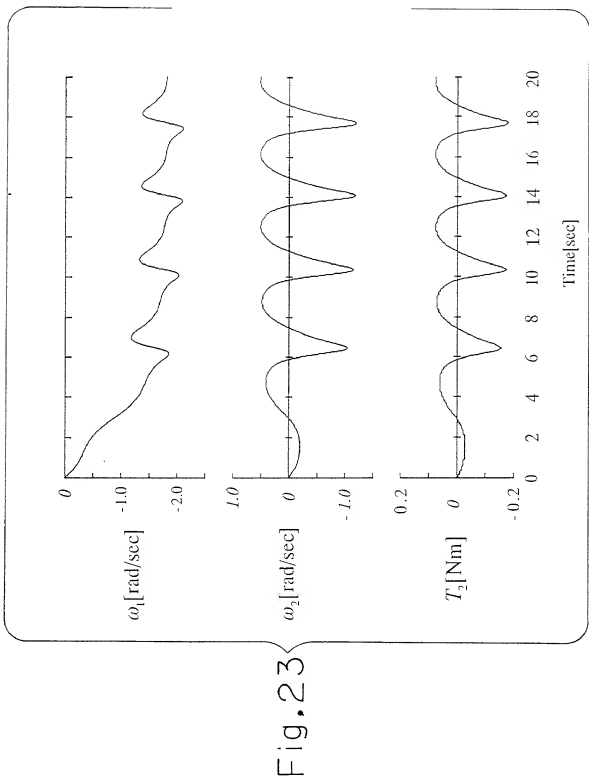


Fig.22



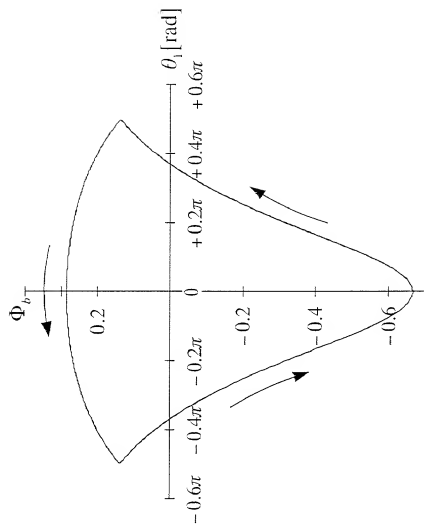


Fig.24

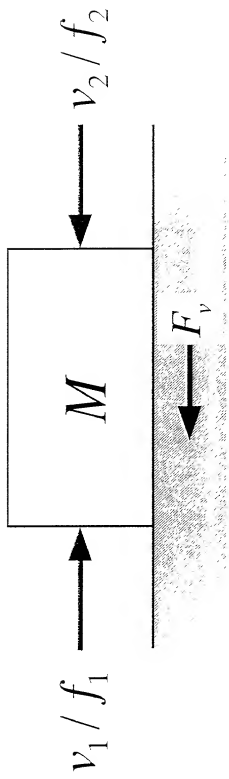


Fig.25

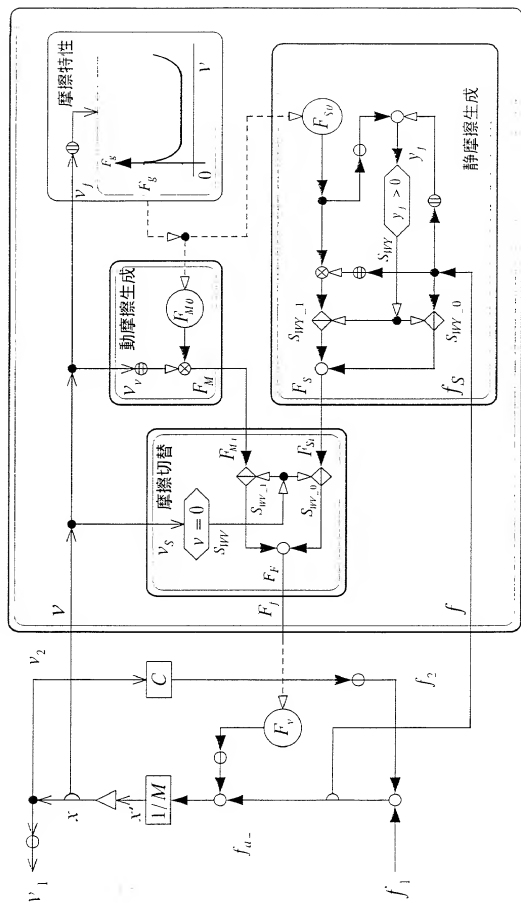
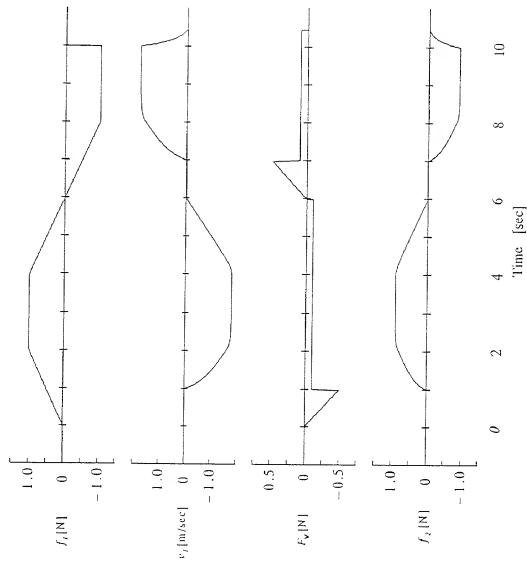


Fig.26

Fig. 27



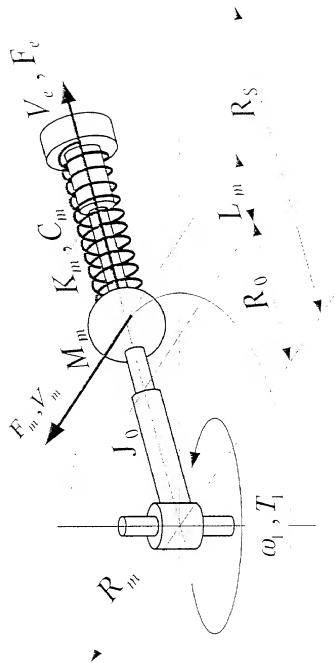


Fig.28

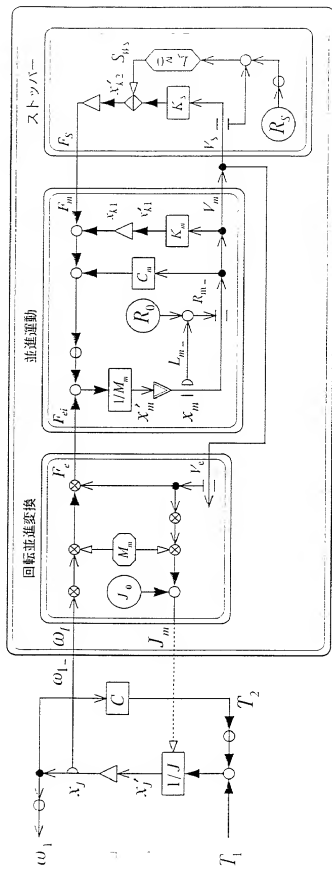


Fig.2.9

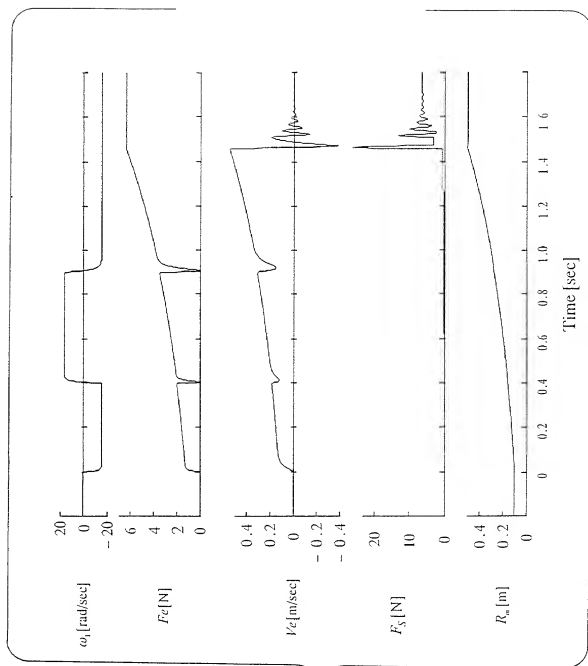


Fig. 30

30

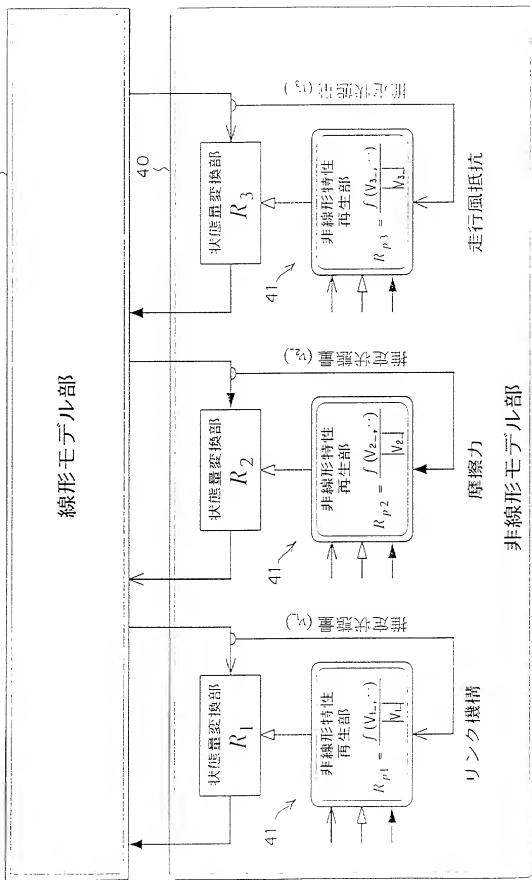


Fig.31

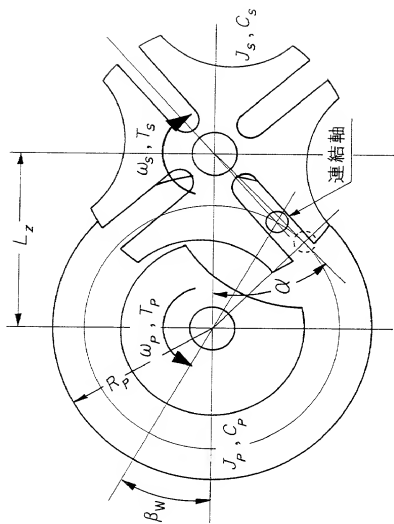


Fig.3.22

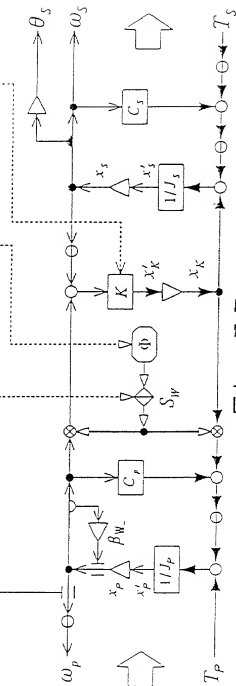
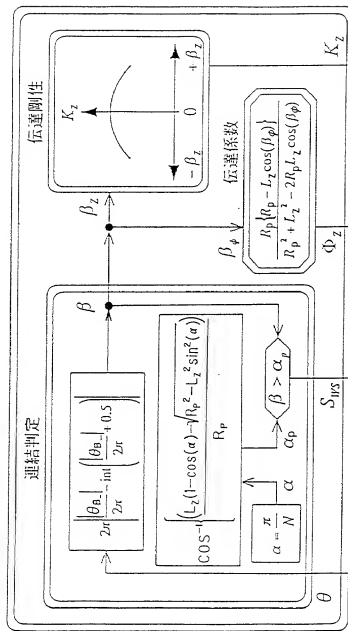


Fig.3.3

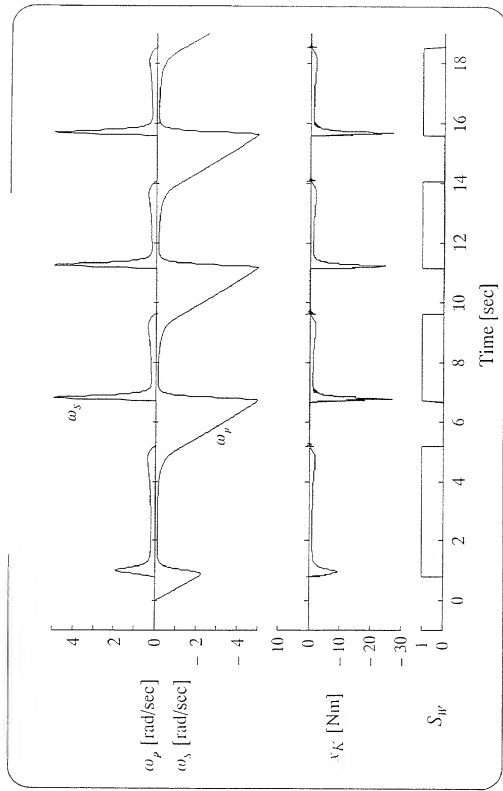


Fig.34

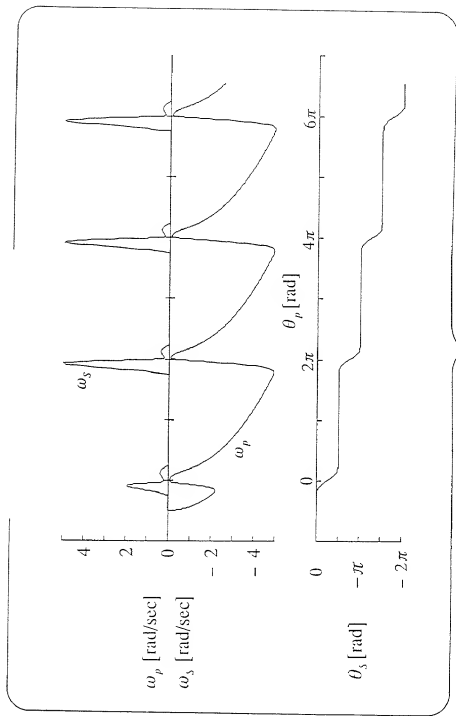


Fig.3.5

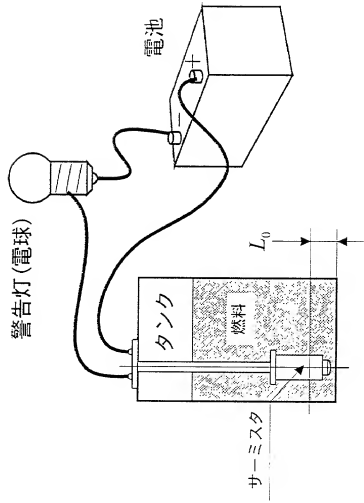


Fig. 36

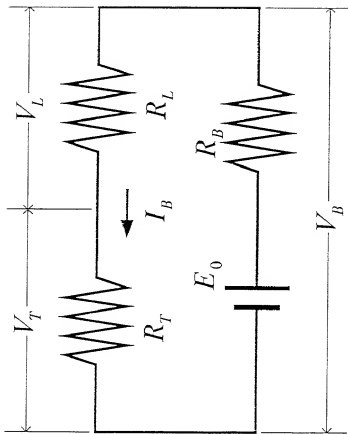


Fig.37

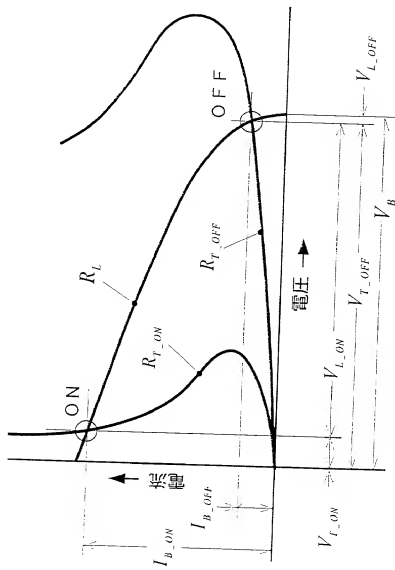


Fig.38

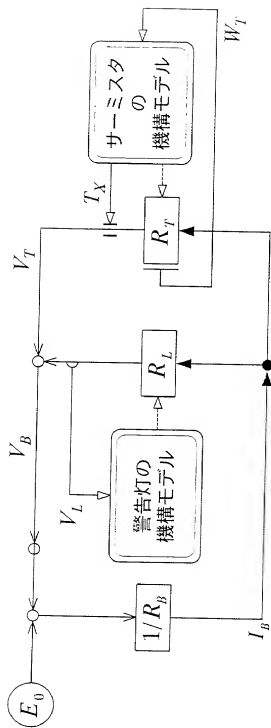


Fig.39

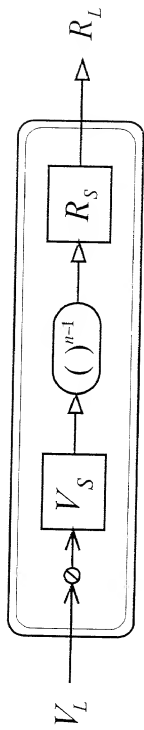


Fig.40

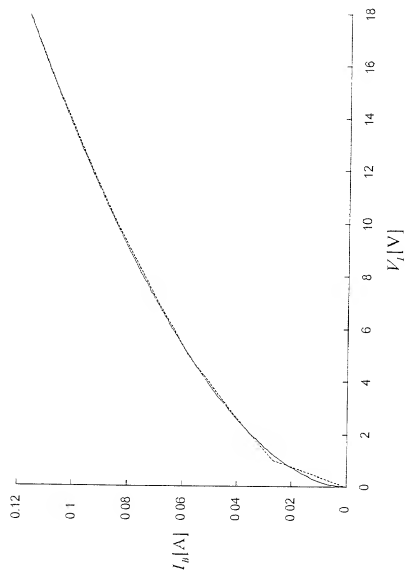


Fig.41

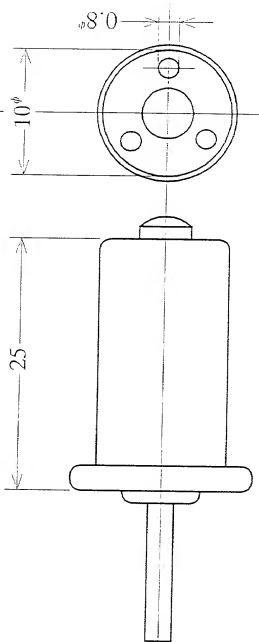
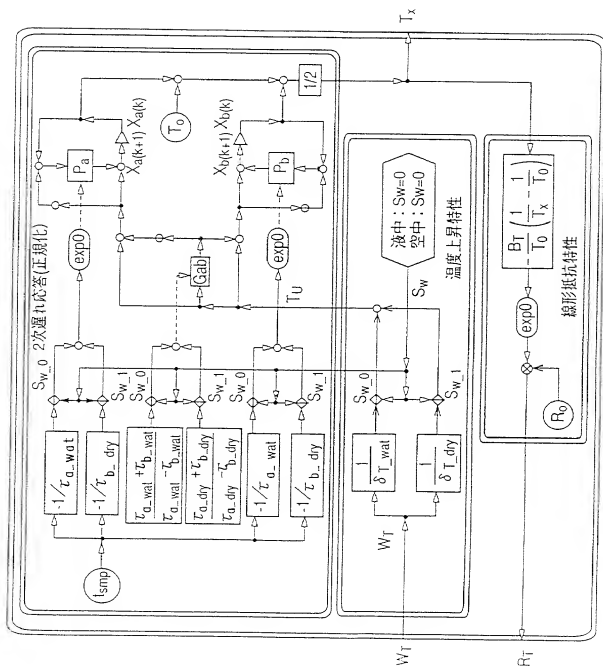


Fig.42



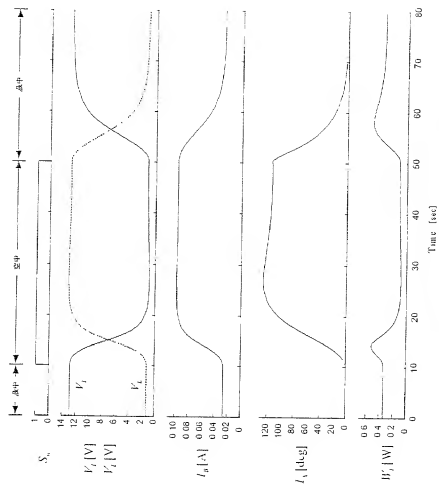


Fig. 4.4

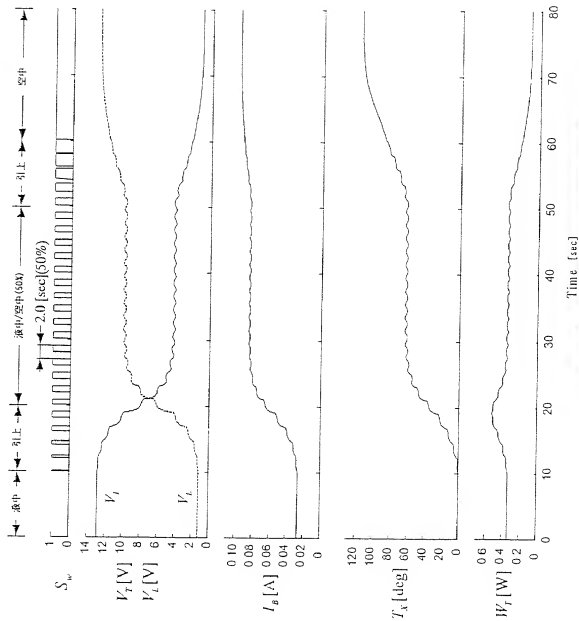


Fig.45

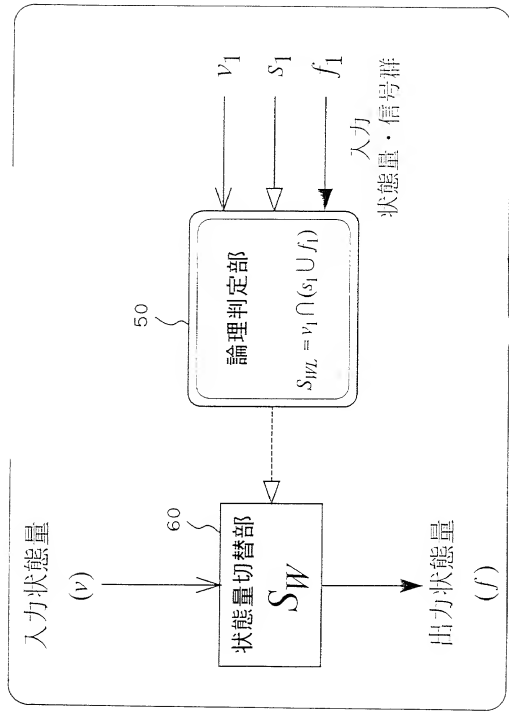


Fig. 46

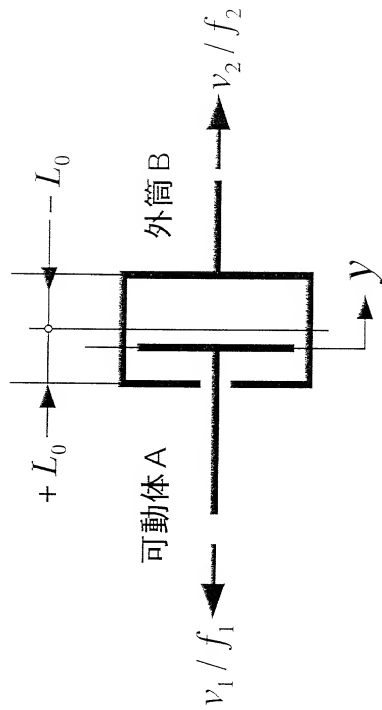


Fig. 4.7

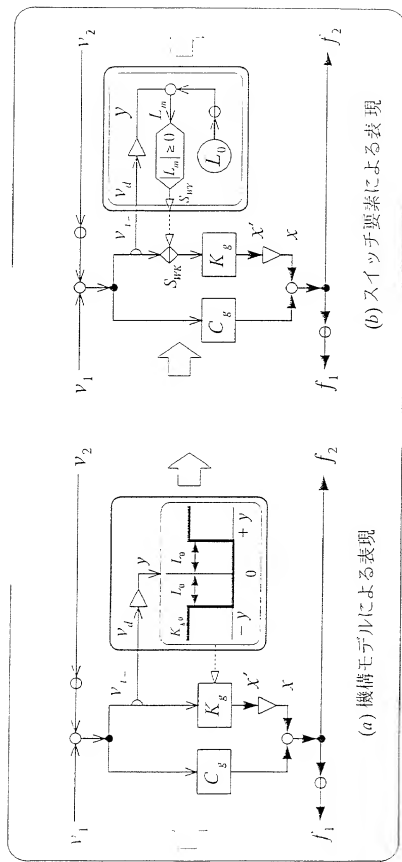


Fig. 4.8

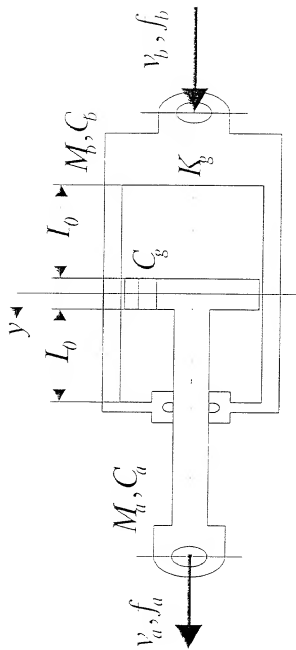
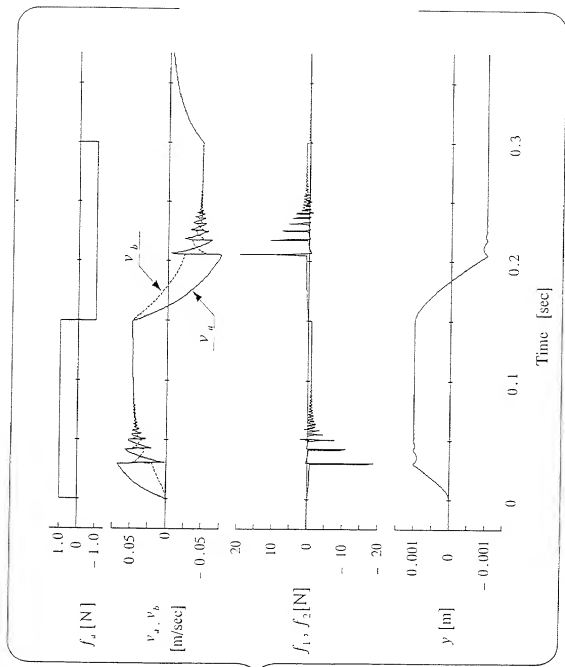


Fig. 49

Fig. 51



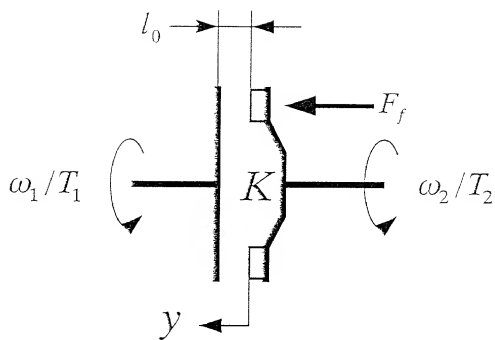


Fig.52

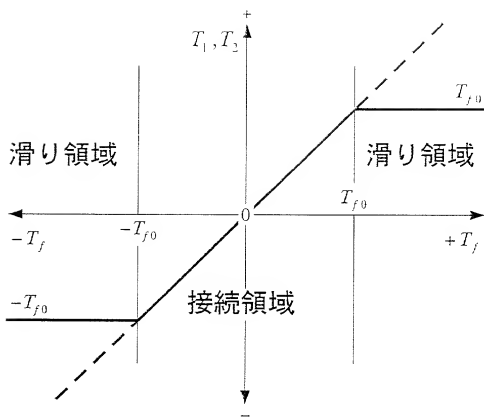


Fig.53

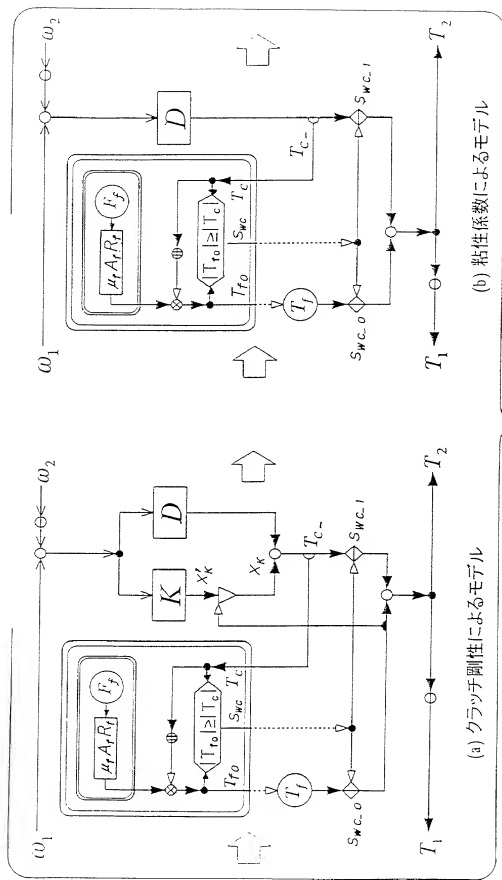


Fig.54

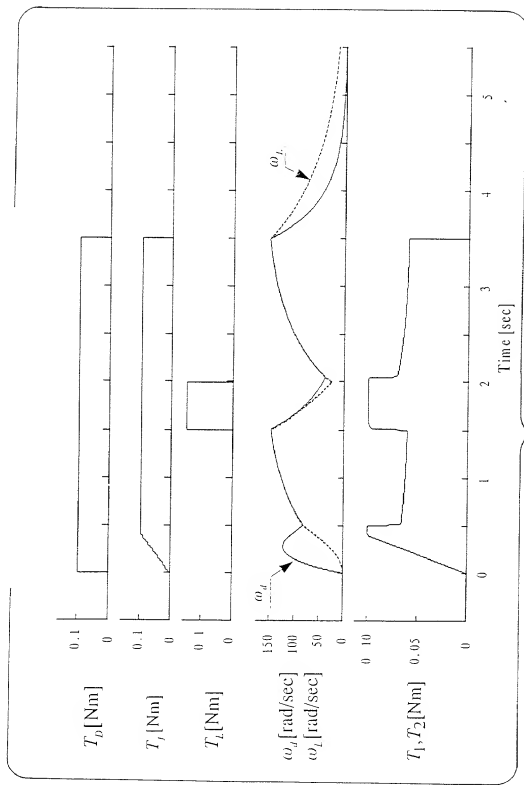


Fig. 5.56

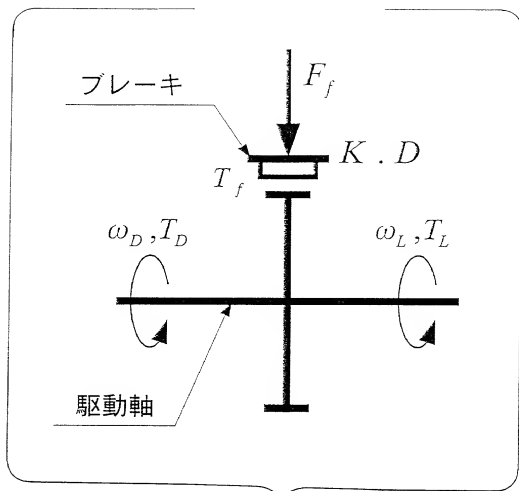


Fig.57

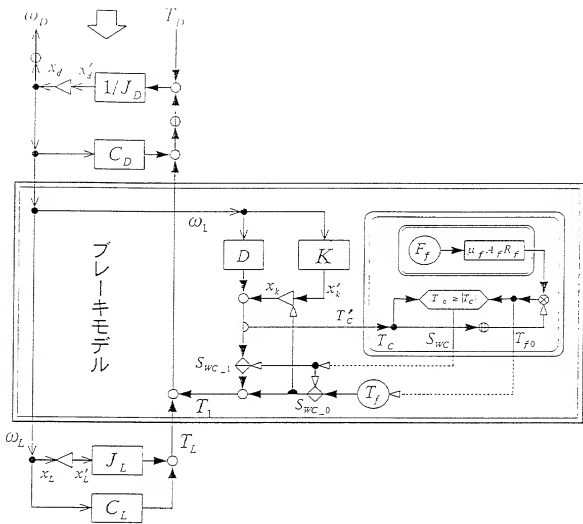


Fig.58

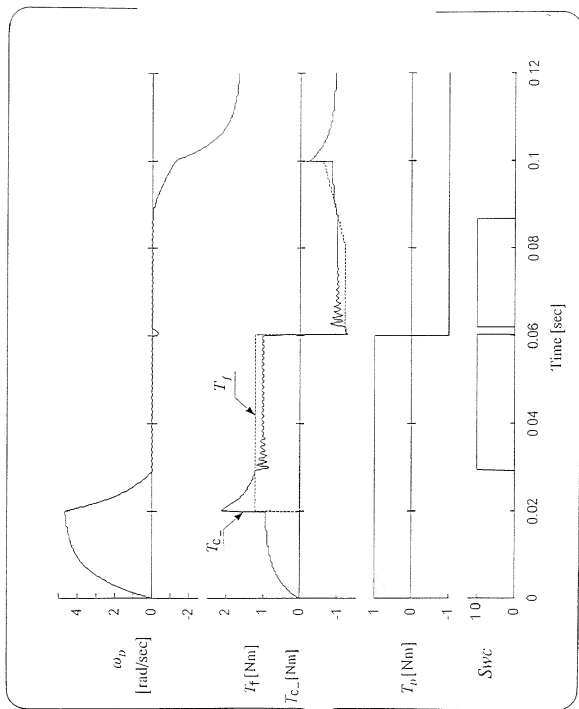


Fig. 59

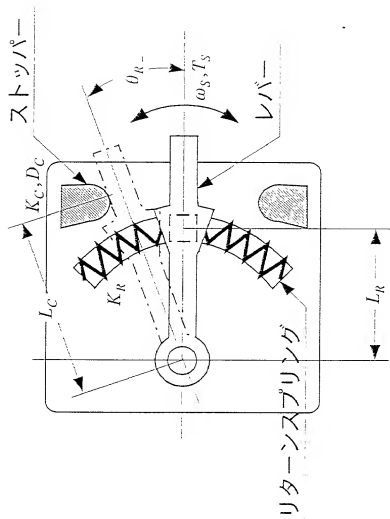


Fig.60

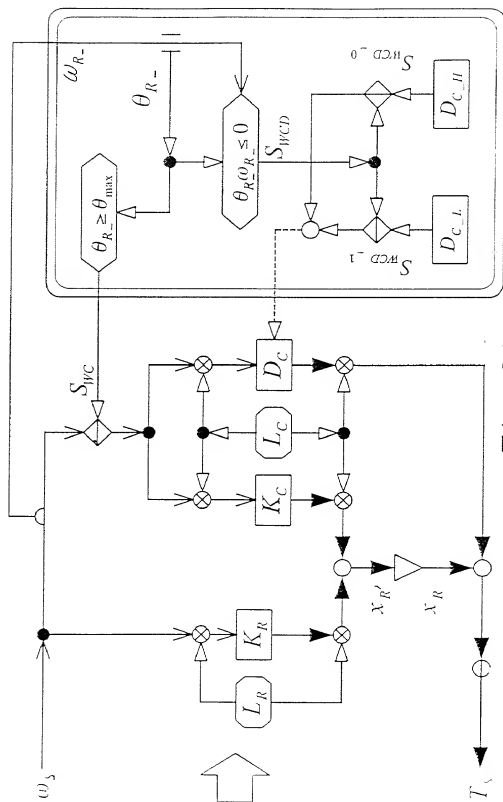


Fig.61

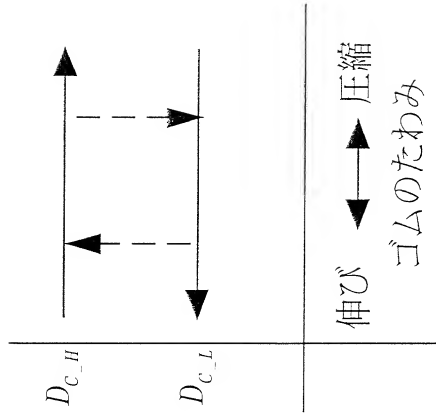


Fig.62

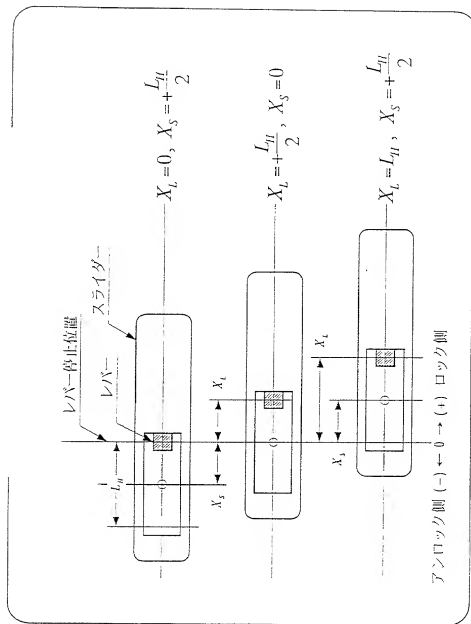


Fig.63

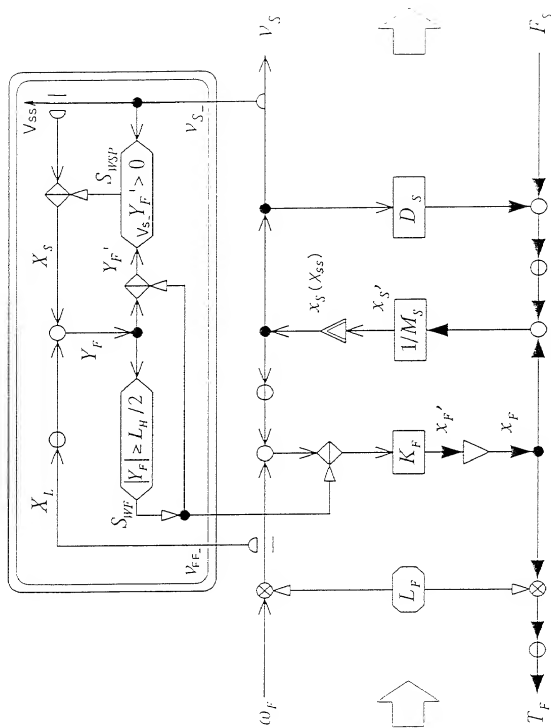


Fig.6.4

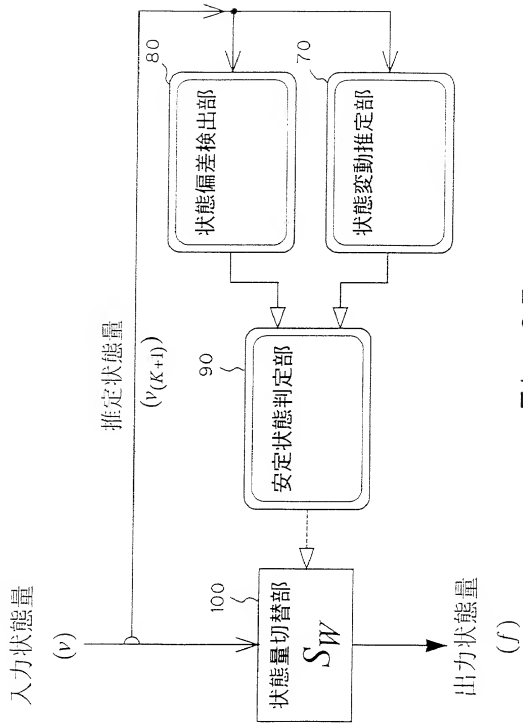


Fig.65

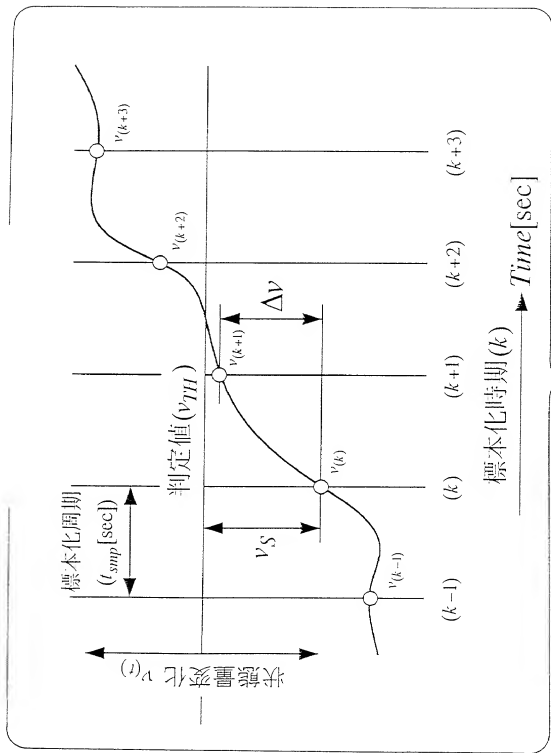


Fig. 6.66

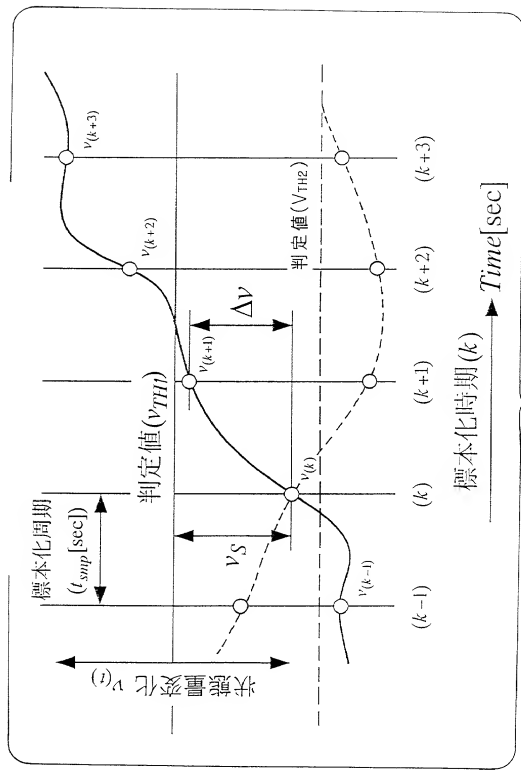


Fig. 6.67

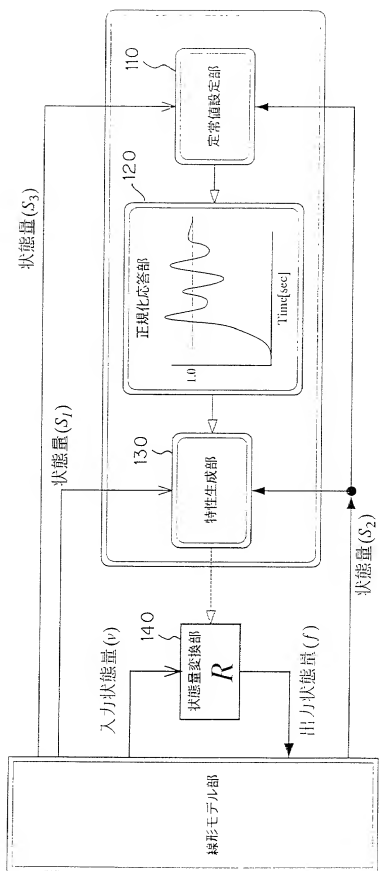


Fig. 6.8

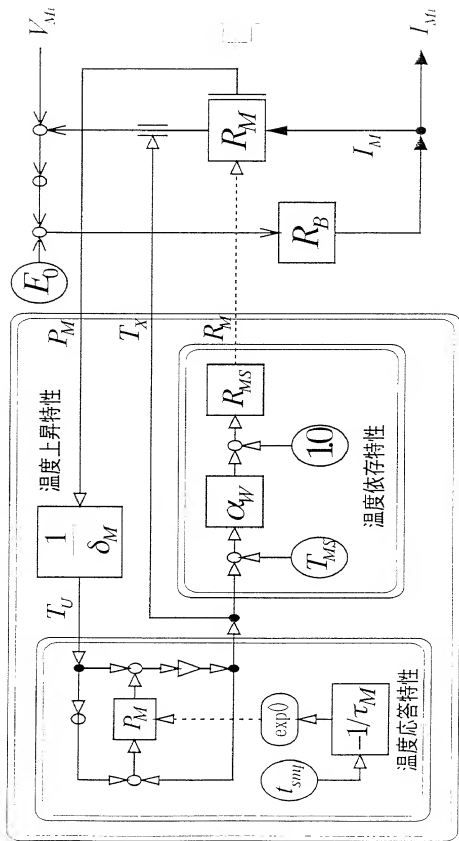


Fig. 6.69

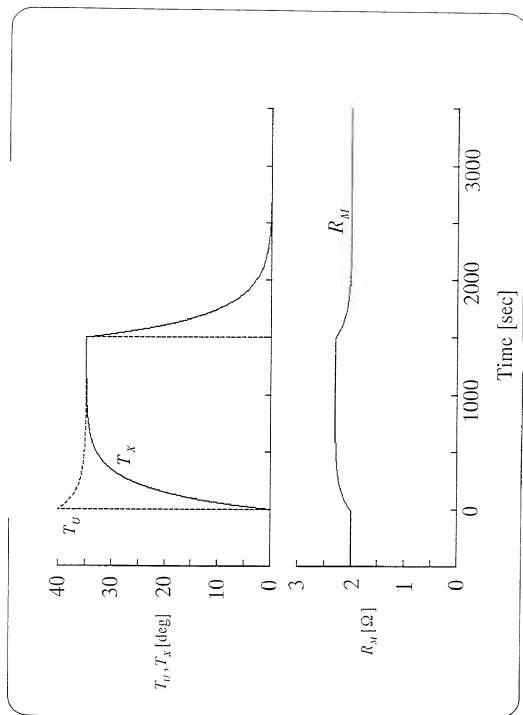


Fig. 7.0

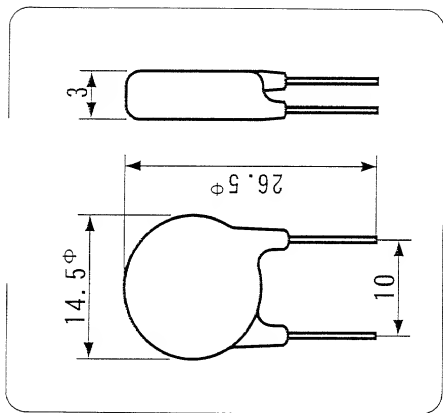


Fig.71

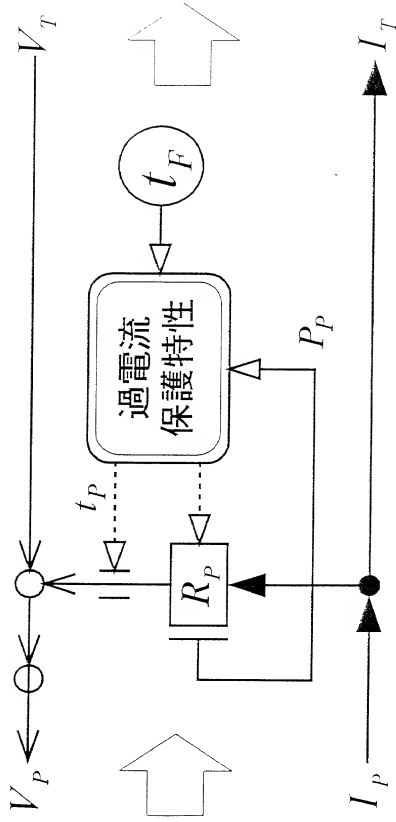


Fig. 7.2

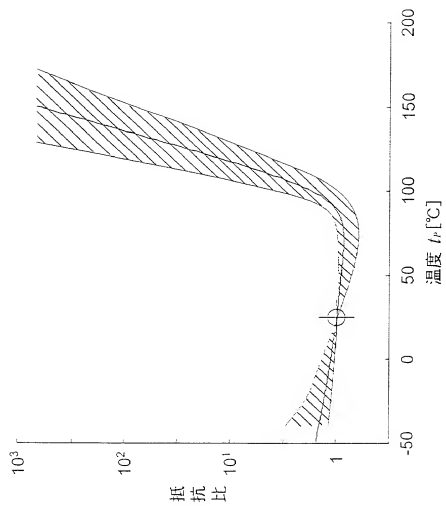


Fig.73

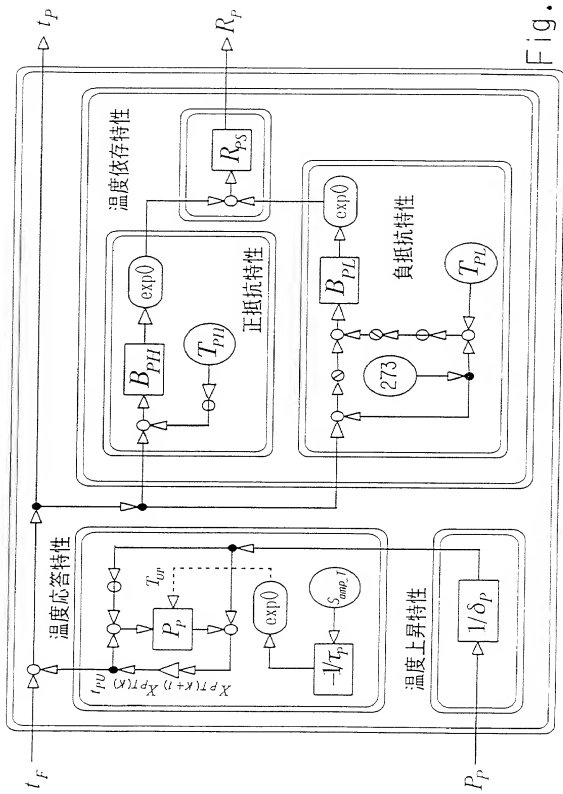


Fig. 74

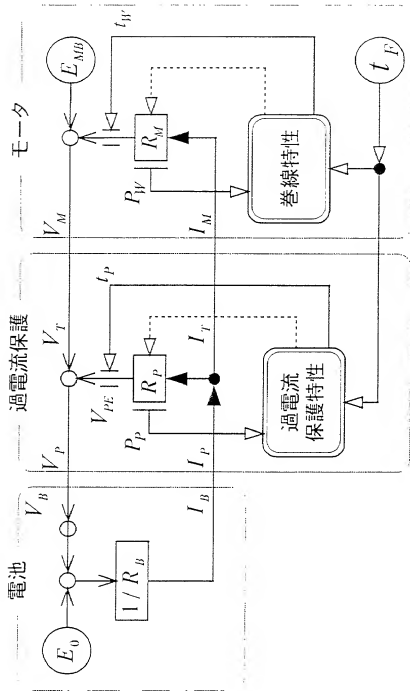


Fig.75

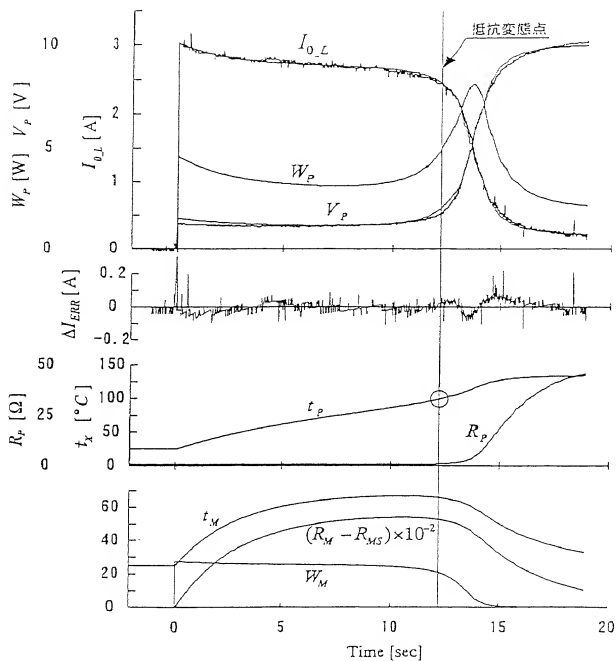


Fig.76

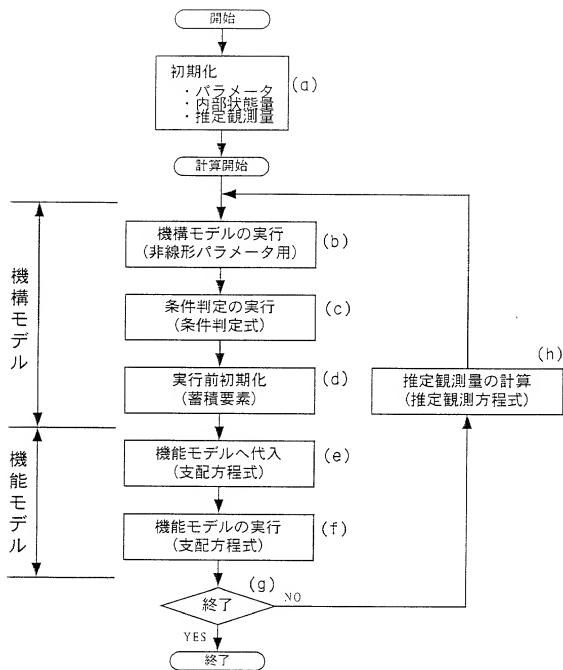


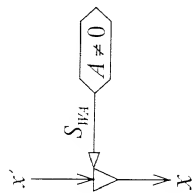
Fig.77

	記号名	記号	備考
状態量	エネルギー		エネルギー 入出力の方向
	位差量		電圧、速度、流量、など
	流動量		電流、力、圧力、など
演算子	加算		$C = A + B$
	乗算		$C = A \times B$
	分岐(分配)		$A = A = A$
	符号変換		$B = -A$
	逆変換		$B = 1/A$
	積分		$B = \int A \, dt$
	微分		$B = dA / dt$
性質	係数変換		$B = R \times A$ (R : 係数)
	特性変換		$B = P \times A$ (P : 特性)
	側負荷		$B = A$ (A : 状態量)
	座標係数		$B = \Phi A$ $\Phi^{-1} D = C$ (Φ : 係数)
参照	観測点		$B = A$ (B : A の観測値)
	機能モデル要素		A_i, B_i : 位差量 A_i, B_i : 流動量
	蓄積状態量 (内部エネルギー)		$B = (A \text{ の内部蓄積設定値})$ $C = (A \text{ の内部蓄積度観測値})$ (A : 位差量)
	エネルギー観測		$C = iB \text{ or } A^i R$ (i : B の A に対する感度)

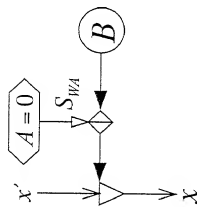
Fig.78

量	操作量 代入量	操作・特性値(戻り値以外の信号) 特性・係数・側負荷値の代入
論理演算子 (機能モデル用)	推定観測量 	$B_{(k+1)} = f_{(k+1)}$ Bは現在(k)の一つ先導本化周期(k+1)の値を観測する。
	時刻観測 	常時: $A = 1$ or 0 Aが1になる瞬間の実行時刻 t_{act} をBに記憶して維持する
	NCスイッチ (常時ON) 	常時: $C = 0$ $if (C = 1) then (B = A) else (B = 0)$
	NOスイッチ (常時OFF) 	常時: $C = 0$ $if (C = 1) then (B = A) else (B = 0)$
	論理積 	$C = \min(A, B)$ (入力A, Bの小さい方をCとする)
	論理和 	$C = \max(A, B)$ (入力A, Bの大きい方をCとする)
非線形演算子 (機構モデル用)	絶対値 	$B = A $
	符号 	$B = \begin{cases} A \\ -A \end{cases}$
	2乗 	$B = A^2$
	初期化(積分) 	$if (C = 0) then B = \int A dt$ else $B = 0$
	畳込み積分 	
	標本化 	$B_{(k)} = A_{(k-\Delta t)}$ (入力Cは標本化のタイムリム) $B_{(k)} = A_{(k+1)}$ (入力Cを遅延したとき)
	条件判定 	$if (Cond) then (B = 1) else (B = 0)$ (Cond 条件判定式)
	関数式 	$B = func(A)$ (func() 関数式/定式)
	操作 	$A = B$ (A, B 変数)

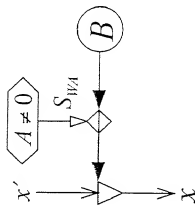
Fig.79



(a) リセット

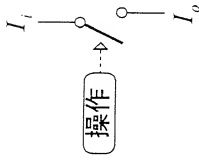


(b) 条件成立で初期化

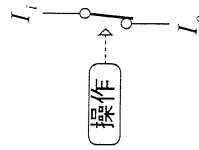
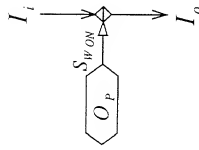


(c) 条件不成立で初期化

Fig.80



(a) NOスイッチ



(b) NCスイッチ

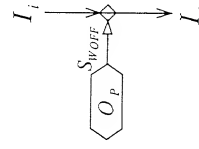


Fig.81

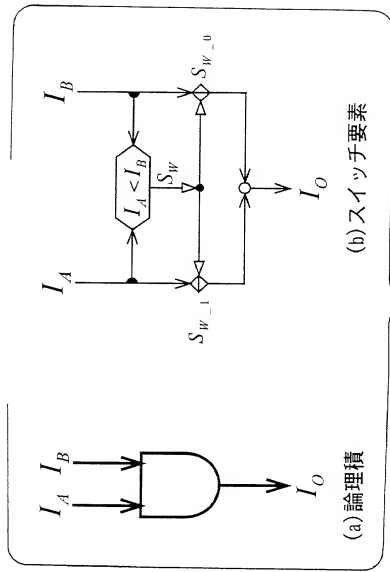
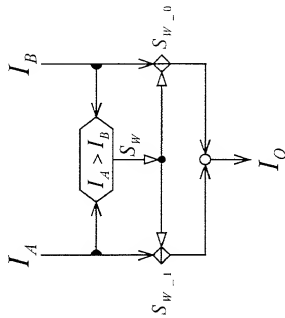


Fig.82



(a) 論理和



(b) スイッチ要素

Fig. 83